

Trabajo de Fin de Grado

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

**Desarrollo de un software para el cálculo y el
análisis de parámetros de rugosidad**

MEMORIA

Autor: Francisco Vera Pérez
Director: Alejandro Domínguez Fernández
Convocatoria: Septiembre 2018



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resumen

Actualmente, los controles de calidad son cada vez más rigurosos e importantes, no solamente de las características dimensionales, sino que también se realizan inspecciones de la calidad del acabado dimensional. En este punto, se enmarca la verificación de la rugosidad a partir de parámetros que definan su calidad de forma cuantitativa.

Se define la rugosidad como el conjunto de irregularidades de la superficie, a nivel microscópico. La rugosidad corresponde a las irregularidades provocadas por la herramienta o elemento utilizado en su proceso de producción.

La verificación del acabado superficial, no es un procedimiento sencillo. Existen una gran cantidad de parámetros que sirven para ofrecer una información sobre un aspecto de la superficie. Dos superficies distintas pueden tener un mismo parámetro que dé un resultado similar, ahí reside la importancia de saber interpretar todos los parámetros existentes, para poder confeccionar una idea exacta de la superficie.

El objetivo principal del presente Trabajo Final de Grado, es el desarrollo de un software mediante el cual se puedan calcular diferentes parámetros de rugosidad a partir de perfiles y/o topografías superficiales, ya sea obtenidas por medición de piezas o por simulación, de forma que se puedan analizar varias muestras a la vez y cuyo resultado se pueda presentar unificado para cada lote de muestras. Dicho software, se debe ajustar a la normativa de rugosidad actual y tener la posibilidad de añadir nuevos parámetros y modificar los algoritmos de cálculo de los parámetros.

La presente memoria contiene la base teórica tanto de los parámetros de rugosidad, como del tipo de filtro de datos a utilizar, sobre los cuales se va a basar el software de rugosidad. Se proporciona, además, información de varios de los métodos actuales para la medición de rugosidad y una explicación del funcionamiento del programa. La información teórica necesaria para desarrollar el programa se encuentra también en la memoria.

Finalmente, se realiza la comparación del estudio entre los valores obtenidos a partir del software desarrollado y un software comercial, de manera que se puedan validar los resultados.

Índice

1. INTRODUCCIÓN	7
1.1. Motivación.....	7
1.2. Objetivos del proyecto	7
2. REPASO HISTÓRICO	10
3. POR QUÉ ES IMPORTANTE LA RUGOSIDAD	11
4. METROLOGÍA DIMENSIONAL	13
4.1. Definición de metrología dimensional	13
4.2. Irregularidades en las piezas.....	13
4.2.1. Irregularidades macrogeométricas	13
4.2.2. Irregularidades microgeométricas	17
5. CARACTERIZACIÓN DE LA SUPERFICIE	19
5.1. Regulación existente	19
5.2. Tipos de perfil	20
5.2.1. Longitud de muestreo y longitud de evaluación	21
5.3. Parámetros bidimensionales (estudio del perfil)	22
5.3.1. Parámetros de amplitud (pico y valle).....	23
5.3.2. Parámetros de amplitud (valores medios de ordenadas)	24
5.3.3. Parámetros de espaciamento	26
5.3.4. Curva de tasa de material (Curva de Abbott-Firestone)	27
5.3.5. Curva de probabilidad de material	31
5.4. Parámetros tridimensionales (estudio de la superficie)	33
5.4.1. Curva de tasa de material (Curva de Abbott-Firestone)	36
5.4.2. Curva de probabilidad de material	38
5.5. Filtrado de datos	40
5.5.1. Filtro de media móvil.....	40
5.5.2. Filtro gaussiano	40
6. SISTEMAS PARA LA MEDICIÓN DE LA RUGOSIDAD	43
6.1. Sistemas de medición de la rugosidad con contacto	43
6.1.1. Sistemas basados en palpador	43
6.2. Sistemas de medición de la rugosidad sin contacto	44
6.2.1. Medición por iluminación de la superficie	44
6.2.2. Interferometría Speckle	45
6.2.3. Triangulación láser con microscopio	47

6.2.4.	Interferometría de desplazamiento de fase	47
6.2.5.	Interferometría con luz blanca	48
6.2.6.	SORM: Superfast Optical Roughness Measurement	49
6.2.7.	Medición Confocal	50
6.2.8.	Elipsometría	50
7.	RELACIÓN PROCESO/ACABADO SUPERFICIAL	52
8.	PROGRAMA	54
8.1.	Objetivos del programa	54
8.2.	Qué ofrece el programa en función del tipo de estudio	54
8.3.	Funcionamiento del programa	55
8.4.	Funcionamiento de la interfaz gráfica	57
8.5.	Estructura del programa	60
8.6.	Análisis de resultados en un estudio bidimensional	66
9.	CONCLUSIONES	75
9.1.	Propuestas de ampliación	75
10.	AGRADECIMIENTOS	77
11.	BIBLIOGRAFÍA	78

1. Introducción

1.1. Motivación

Entre todas las asignaturas del Grado de Ingeniería en Tecnologías Industriales, una de las que me ha parecido más interesante, ha sido la de Sistemas de Fabricación. Unido a este hecho, el realizar las prácticas curriculares en CIM-UPC, centro tecnológico de la Universitat Politècnica de Catalunya, lugar donde se puede ver de primera mano varios de los puntos explicados en clase, me motivó a realizar el proyecto en esta materia.

Entre los diferentes aspectos en los cuales se centra la asignatura, una buena parte está enfocada a la metrología dimensional y a los diferentes procesos de mecanizado. Una buena forma de ampliar conocimientos acerca de este tema era poder realizar un trabajo que tuviera relación con esta parte de los estudios.

El proyecto abarca una gran parte teórica sobre metrología dimensional y una pequeña parte acerca de los procesos de mecanizado, con lo cual, quedaba cubierta una buena parte de mi interés y motivación principal.

Por otra parte, surgió una motivación extra, al poder crear una aplicación informática desde cero, y de esta manera, volver a retomar varias cosas de las aprendidas en programación.

1.2. Objetivos del proyecto

En el Laboratorio de Fabricación del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona, se realizan varios proyectos relacionados con el acabado superficial, donde a partir de una serie de muestras, se realiza una medición a la superficie y se obtienen una serie de datos para su posterior análisis. Dicho análisis se realiza con un software comercial, el cual, a partir de una lectura del archivo obtenido de la medición de la superficie de la muestra, es capaz de ofrecer una serie de datos relacionados con la rugosidad de la superficie.

En el Laboratorio de Fabricación, se acostumbra a trabajar con una gran cantidad de muestras, extraídas todas ellas de mediciones. Es en este aspecto donde empiezan a surgir los primeros inconvenientes de los programas disponibles, ya que no permiten el análisis de varias muestras al mismo tiempo, con lo cual, el análisis de varias muestras resulta un procedimiento tedioso. Al ser un laboratorio docente y de investigación, es usual el requerimiento del estudio de parámetros de rugosidad poco usuales respecto a los que

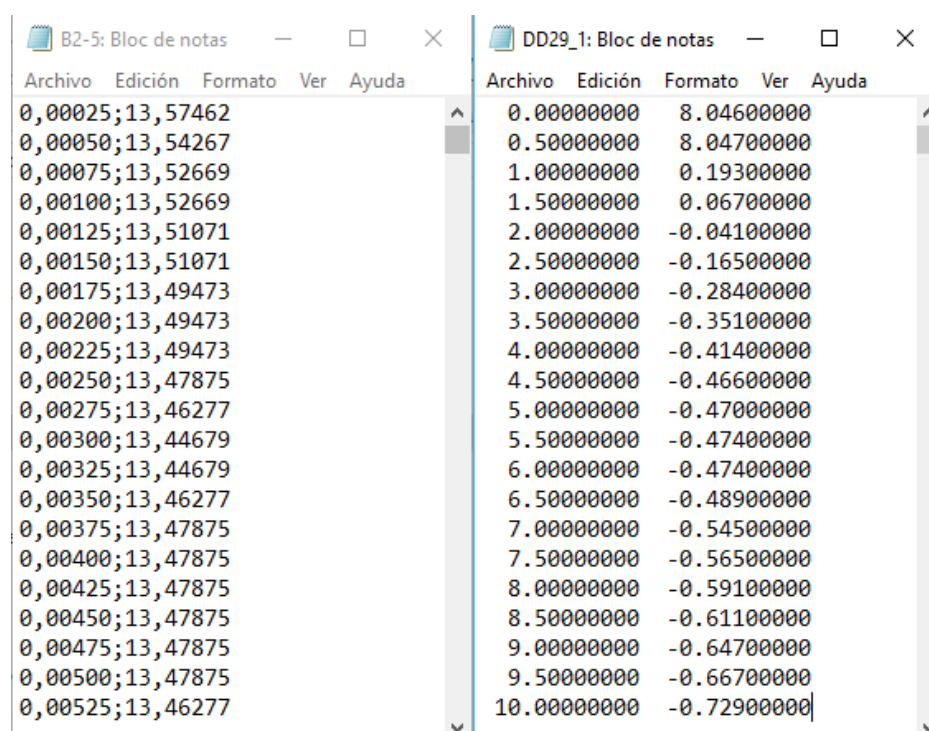
se pueden encontrar en los programas comerciales.

El objetivo principal en el que se va a basar este proyecto es la creación de un programa dedicado al cálculo y el análisis de parámetros de rugosidad a partir de perfiles y/o topografías superficiales. Para diferenciar este programa de los que se pueden encontrar en el mercado, se van a marcar las siguientes pautas:

- 1) El programa debe permitir el estudio de varios archivos a la vez.

Uno de los principales problemas de los programas que se pueden encontrar usualmente en el mercado, es que solamente dan la posibilidad de realizar el estudio de un único archivo. Es requerimiento esencial, que el programa a desarrollar permita escoger y trabajar fácilmente entre varios archivos de entrada, siempre y cuando los datos de los ficheros mantengan el mismo formato.

- 2) Se contemplarán varios formatos de entrada de los datos en forma de ficheros .txt.



Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda
0,00025;13,57462				
0,00050;13,54267				
0,00075;13,52669				
0,00100;13,52669				
0,00125;13,51071				
0,00150;13,51071				
0,00175;13,49473				
0,00200;13,49473				
0,00225;13,49473				
0,00250;13,47875				
0,00275;13,46277				
0,00300;13,44679				
0,00325;13,44679				
0,00350;13,46277				
0,00375;13,47875				
0,00400;13,47875				
0,00425;13,47875				
0,00450;13,47875				
0,00475;13,47875				
0,00500;13,47875				
0,00525;13,46277				

Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda
0.00000000	8.04600000			
0.50000000	8.04700000			
1.00000000	0.19300000			
1.50000000	0.06700000			
2.00000000	-0.04100000			
2.50000000	-0.16500000			
3.00000000	-0.28400000			
3.50000000	-0.35100000			
4.00000000	-0.41400000			
4.50000000	-0.46600000			
5.00000000	-0.47000000			
5.50000000	-0.47400000			
6.00000000	-0.47400000			
6.50000000	-0.48900000			
7.00000000	-0.54500000			
7.50000000	-0.56500000			
8.00000000	-0.59100000			
8.50000000	-0.61100000			
9.00000000	-0.64700000			
9.50000000	-0.66700000			
10.00000000	-0.72900000			

Figura 1. Ejemplo de distintos formatos de entrada del texto

Usualmente, los ficheros proporcionados para realizar el análisis, no mantienen en mismo formato. Aunque se mantenga el formato por columnas en todos los ficheros, en ocasiones puede que el separador decimal pueda variar entre un punto o una coma, o que las unidades de las columnas estén en micras o milímetros.

En el ejemplo de la *Figura 1*, en la parte izquierda el separador decimal es una coma, las unidades están en milímetros y en micras y el elemento separador entre columnas de datos es el punto y coma. En la parte derecha, el separador decimal es el punto, las unidades están en micras y el elemento separador entre columnas es el espacio en blanco.

Todas estas variantes del formato deben estar contempladas en el programa, a fin de poder realizar una mayor cantidad de análisis.

3) Los resultados del lote analizado deben darse en un único archivo.

Para cada lote de muestras analizadas, además de la información más detallada de cada muestra por separado, se crea un documento que contenga, de manera unificada, los parámetros más característicos de cada una de las muestras a estudio, de manera que se pueda realizar una valoración rápida de cada una de las muestras.

4) Los resultados deben mostrarse en un formato sencillo de analizar.

Los archivos donde se van a mostrar los resultados, deberán ofrecerse en un formato de archivos universal (formato .txt) que posibilite un fácil y correcto análisis de los mismos. Además, se debe ofrecer un documento por cada fichero de entrada a modo de resumen.

5) El programa debe ajustarse a la normativa actual en el cálculo de la rugosidad.

Tanto el cálculo de los parámetros como el filtro empleado para el cálculo de los datos, debe adecuarse a la normativa actual de rugosidad.

6) Se debe permitir la creación de nuevos parámetros.

Al tratarse de un programa que se va utilizar en un laboratorio docente y de investigación, se debe dar la posibilidad a implementar nuevos parámetros de cálculos que puedan no estar recogidos en la normativa de rugosidad pero que resulte de gran interés el calcularlos.

7) Se debe dar la posibilidad a modificaciones en el futuro.

El programa debe estar preparado para poderse ampliar en el futuro, es decir, tiene que dar pie a estar en evolución y ofrecer posibilidades de ampliación, no realizando un programa cerrado.

2. Repaso histórico

Existen desde los años 1700 a 1800, algunos estudios relacionados con la fricción y el desgaste que hacen referencia a lo que ahora conocemos como rugosidad superficial.

A partir de la revolución industrial, se empezó a necesitar algún procedimiento para medir la textura superficial y cuantificarla con exactitud. Durante esta época y hasta la década de 1940 los dispositivos de medida eran superficies de referencia trabajadas a máquina mediante diferentes procesos, lo cual dotaba a las superficies de distintos tipos de rugosidad superficial. La forma común de medir la rugosidad era lo que se llamaba el “Test de la uña” en el cual el operario comparaba la superficie de la pieza muestra con la superficie de la pieza mecanizada.

A principios del siglo XX, se desarrolló una especie de perfilómetro¹ portátil que proporcionaba una medición semicuantitativa de la rugosidad superficial de las superficies mecanizadas.

A partir de la década de 1970, las industrias realizaron un esfuerzo grande en el campo de la metrología. Con las máquinas de control numérico² más sofisticadas que se iban fabricando, se fabricó un nuevo e innovador perfilómetro mecánico para realizar mediciones de la superficie. Se diseñó principalmente para medir pequeños pasos en superficies mecanizadas en un rango de las micras. A causa del peso de la aguja de estos perfilómetros (entre 40mg y 100mg), siempre quedaba una marca en la superficie donde se realizaba la medición. No fue hasta la década de 1980 donde se demostró a partir de una serie de estudios que un perfilómetro mecánico podía usarse de forma que no estropearla la superficie reduciendo la carga del estilite. Durante este mismo periodo de tiempo, se empezaron a desarrollar perfilómetros ópticos sin contacto.

A partir de la década de 1990, el tremendo crecimiento de la velocidad de computación y el aumento de la memoria de los ordenadores, ha posibilitado una gran mejora de los instrumentos hasta el día de hoy. Las computadoras modernas han permitido desarrollar instrumentos rápidos, automatizados y fáciles de usar.

¹ Equipo utilizado para evaluar superficies que produce un registro continuo de la superficie entre puntos dados.

² Sistema que permite controlar en todo momento la posición de un elemento físico. En este caso, una herramienta que está montada en una máquina.

3. Por qué es importante la rugosidad

Actualmente, cada vez es más demandado un control del 100% de la producción, no solamente fijándose en la existencia de defectos en las piezas o de si cumplen con las tolerancias de forma, sino que, además, se pide que la pieza cumpla ciertos requisitos referentes a la rugosidad superficial. En este mismo punto de control de la calidad superficial, se encuentra la medición de rugosidad y ondulación de las superficies, a partir de una serie de parámetros que las definen.

Se define la rugosidad, como el conjunto de irregularidades de la superficie real, es decir, de la superficie de una pieza, donde los errores de forma y las ondulaciones han sido eliminados. Básicamente, la rugosidad corresponde a las irregularidades que dejan los elementos que atacan a la superficie en los procesos de producción, tales como la herramienta o las características del corte.

Tanto en aplicaciones industriales como en la vida cotidiana, el grado de rugosidad de las superficies es importante, en ocasiones es deseable tener una rugosidad “alta” mientras que en otras ocasiones esta condición es indeseable. En ciertos casos se busca que la superficie del producto terminado presente una rugosidad baja, ya que esto le da brillo, mejor apariencia y disminuye la fricción de la superficie al estar en contacto con otra, reduciendo el fenómeno de desgaste y la corrosión o erosión de dichos materiales.

Por otra parte, la fricción entre dos superficies permite sujetar un objeto sin que este resbale. Es la rugosidad de los neumáticos de los automóviles lo que permite la fricción entre ellos y el suelo, permitiendo de esta manera el agarre.

Las diferentes fases de acabado que tiene una pieza mecanizada hacen referencia al aspecto superficial y la rugosidad alcanzada durante el mismo, teniendo por objetivo que dicha pieza se adecue a unas determinadas especificaciones de acabado, sin que ello afecte a su dimensionamiento tal y como se puede apreciar en la *Figura 2*. Anteriormente se ha explicado que, en ocasiones, es necesario un buen acabado superficial según la aplicación requerida. En consonancia con este acabado, está muy directamente relacionado el coste de la pieza ya que, a mejor acabado superficial, mayor es el tiempo empleado en él y, por lo tanto, mayor es el coste.

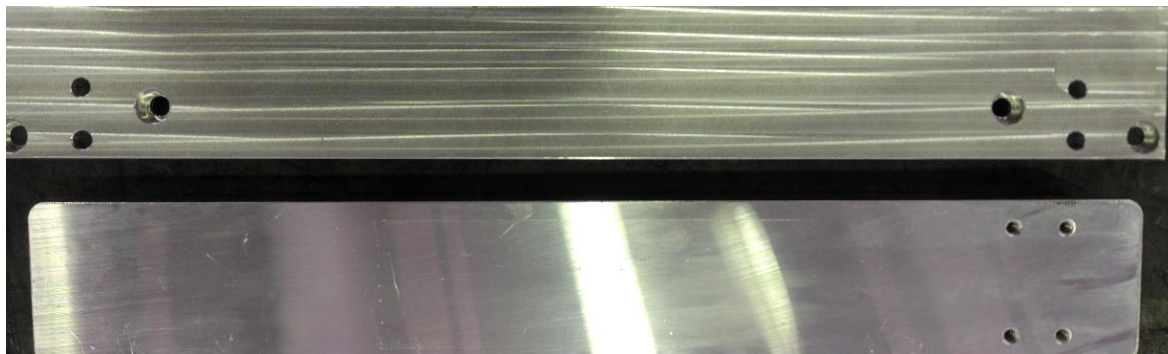


Figura 2. Imagen donde se puede apreciar el distinto acabado superficial. La imagen superior, presenta un acabado de menos calidad que el acabado de la pieza inferior

Cuando se define geométricamente una pieza, ésta estará afectada de una tolerancia en aquellas zonas donde debido a su funcionalidad, montaje o cualidades sea requerida. De la misma forma, será necesario poder definir y expresar de forma numérica dicho acabado superficial, y se conseguirá mediante la medición de la rugosidad. La evaluación de la rugosidad será muy importante en fenómenos de rozamiento, por ejemplo, donde las crestas de una de las superficies en contacto tienden a entrar en los valles de la otra, debiendo controlarse este hecho para que el comportamiento sea el idóneo. La rugosidad es el parámetro más representativo para describir la textura superficial por su influencia directa en la fricción, fatiga, resistencias electrónica y térmica, etc.

4. Metrología dimensional

4.1. Definición de metrología dimensional

La metrología dimensional es la ciencia que se ocupa de la medición de magnitudes geométricas (longitudes, ángulos, planitud, cilindridad, rugosidad, etc.).

Otra definición bastante amplia y que involucra además el concepto de verificación es que, medir, es comparar una magnitud determinada con otra del mismo tipo.

4.2. Irregularidades en las piezas

En un proceso de fabricación existen diversos niveles de acabado superficial, normalmente, para una pieza con acabado liso, se busca que la pieza no tenga irregularidades en la superficie. De todas formas, una superficie perfectamente lisa es imposible de alcanzar, ya que cualquier superficie por perfecta que parezca, presentara irregularidades que se originan a causa de estos procesos de fabricación. A grandes rasgos, una división de estos errores o irregularidades puede ser entre los que se ven a simple vista y los de nivel microscópico.

Las irregularidades mayores (macrogeométricas) son errores de forma, asociados con la variación en tamaño de una pieza, paralelismo entre superficies y planitud de una superficie o conicidad, redondez y cilindridad, y que pueden medirse con instrumentos convencionales.

Las irregularidades menores (microgeométricas) son la ondulación y la rugosidad. La primera pueden ocasionarla la flexión de la pieza durante el maquinado, falta de homogeneidad del material, libración de esfuerzos residuales, deformaciones por tratamiento térmico o vibraciones; la segunda la provoca el elemento utilizado para realizar el maquinado, por ejemplo, la herramienta de corte o la muela del rectificado.

4.2.1. Irregularidades macrogeométricas

Las irregularidades macrogeométricas, pueden ser de dos tipos: dimensionales y de forma.

- Los defectos dimensionales hacen referencia a la diferencia entre las dimensiones obtenidas midiendo la pieza y las teóricas dados por el diseño de la pieza. Estos defectos pueden ser tanto de tipo lineal como de tipo angular. Dependiendo de la herramienta

utilizada para la medición, este error será mayor o menor.

- Los defectos o errores de forma indican diferencias entre la forma real de la pieza y la forma ideal, que es la que viene representada en el diseño de la pieza. Se pueden considerar errores de forma los siguientes casos:

Rectitud: es la distancia entre los puntos de la línea considerada y la recta patrón.

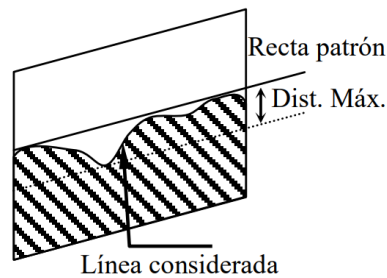


Figura 3. Defecto de rectitud

Planitud: distancia entre cualquier punto de la superficie considerada y el plano envolvente.

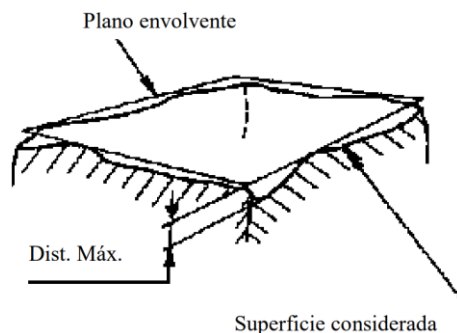


Figura 4. Defecto de planitud

Circularidad: Distancia entre el contorno de la sección normal al eje y el círculo ideal.

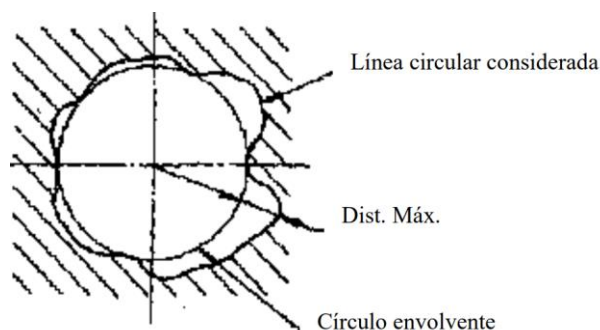


Figura 5. Defecto de circularidad

Cilindricidad: Distancia radial entre cualquier punto de la superficie de un cilindro y la superficie ideal.

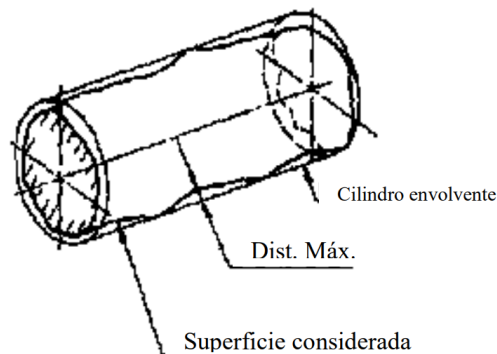


Figura 6. Defecto de cilindridad

▪ Se les llama también defectos de forma a las diferencias entre la posición real de una recta o plano de la pieza respecto de otra recta o plano tomado como referencia cuya geometría es correcta y satisface cierta precisión. Se consideran defectos de este tipo a las deficiencias relacionadas con:

Perpendicularidad: Distancia entre la línea o superficie considerada y una línea envolvente o plano auxiliar perpendicular al plano.

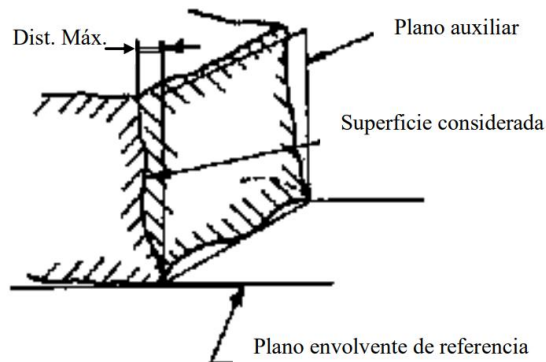


Figura 7. Defecto de perpendicularidad

Paralelismo: Distancia entre cualquier punto de la superficie o línea considerada y un plano patrón que sea paralelo al plano de referencia.

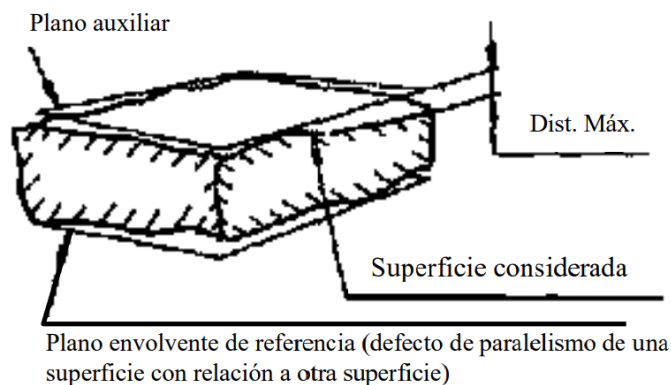


Figura 8. Defecto de paralelismo

Angularidad: Diferencia entre el ángulo medido y el requerido.

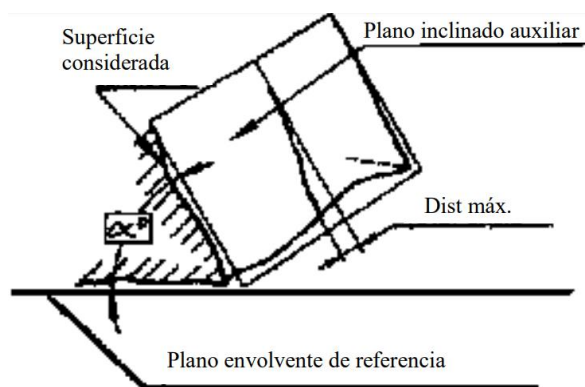


Figura 9. Defecto de angularidad

Excentricidad: Distancia radial entre el eje de una superficie de revolución y un eje de giro paralelo tomado como referencia.

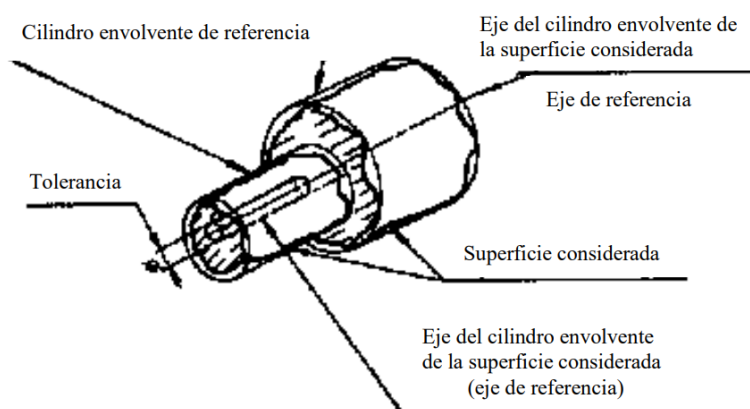


Figura 10. Defecto de excentricidad

Coaxialidad: Diferencia entre la posición real del eje de una superficie de revolución y un eje de giro tomado como referencia. Este defecto incluye el de excentricidad y el de inclinación de ejes.

4.2.2. Irregularidades microgeométricas

Tienen por nombre de irregularidades microgeométricas aquellas que no se ven a simple vista en las cuales se necesita un análisis más exhaustivo para su estudio. La superficie que se va a estudiar, tiene por nombre superficie real (ver Figura 11).

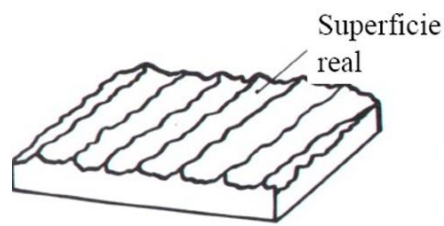


Figura 11. Superficie real

Las superficies reales, por más perfectas que sean, presentan irregularidades características del método empleado para su obtención. En ocasiones, dichas irregularidades son más sencillas de apreciar, como puede ser el caso de una pieza fabricada por impresión 3D, en cambio, si se fabrican piezas mediante procedimientos de arranque de viruta como el fresado o torneado, dichas irregularidades pueden llegar a ser más difíciles de apreciar. Estas superficies, tal y como se puede apreciar en la *Figura 12*, se presentan como un conjunto de irregularidades que tienden a formar un patrón en toda su extensión. En esta superficie se puede distinguir entre ondulación y rugosidad.

- Ondulación:

La ondulación es el conjunto de irregularidades en la superficie en forma de ondas de paso mucho mayor que la amplitud y que pueden ocurrir por diferencia en los movimientos de la máquina-herramienta, por una deformación a causa de un tratamiento térmico, tensiones residuales, etc.

- Rugosidad:

La rugosidad, en cambio, está formada por las marcas dejadas por los elementos que atacan a la superficie en los procesos de mecanizado y se encuentra superpuesta al perfil de ondulación.

- 1- Extensión de rugosidad.
- 2- Extensión de ondulación.
- 3- Orientación de los surcos.
- 4- Amplitud de ondulación.
- 5- Amplitud de rugosidad (Altura pico-valle).

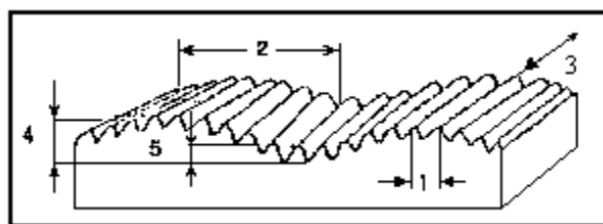


Figura 12. Comparación rugosidad – ondulación

Para el análisis y estudio de todas estas irregularidades, tanto en un análisis bidimensional tomando un perfil como en un análisis tridimensional a partir de una superficie, es necesario un conjunto de herramientas capaces de detectar estas variaciones a partir de un análisis de la pieza y posteriormente un programa que sea capaz de analizar los datos obtenidos y poder mostrar unos datos normalizados.

5. Caracterización de la superficie

Para caracterizar una superficie, método más comúnmente utilizado es el método del perfil, que consiste en la adquisición de un perfil de la superficie a nivel submicrométrico, a continuación, este perfil es filtrado para separar sus componentes de alta y baja frecuencia, obteniendo dos nuevos perfiles; el primero, alta frecuencia, se utilizará para obtener los parámetros de rugosidad y el segundo, componentes de baja frecuencia, se procesará para obtener los parámetros de ondulación. Sobre estos perfiles filtrados se aplicarán los algoritmos para el cálculo de los parámetros que definen el estado de la superficie. Estos perfiles son adquiridos a lo largo de una longitud de muestreo que está definida y establecida en las normas que se verán a continuación.

5.1. Regulación existente

Existe una normativa específica a la hora de definir los parámetros utilizados para la caracterización de la superficie. La normativa más esencial es la siguiente:

- UNE-EN ISO 4287

Esta norma recoge los términos, definiciones y parámetros para la determinación del estado superficial mediante el método del perfil. La norma especifica las características que han de cumplir los perfiles utilizados para la extracción de los parámetros que definen el estado superficial, así como la forma en que deben ser calculados dichos perfiles mediante la aplicación de filtros. En cuanto a los parámetros que definen el estado superficial se encuentran los parámetros básicos de rugosidad y ondulación incluyendo las expresiones matemáticas y los algoritmos que deben ser utilizados para el cálculo.

- UNE-EN ISO 11562

Esta norma recoge las características metrológicas de los filtros corregidos en fase, que deben ser utilizados para la obtención de los perfiles de rugosidad y ondulación. Estos filtros están descritos como una función de ponderación que corresponde a la función de densidad de probabilidad gaussiana. También se especifican, en esta norma, los límites de error para este tipo de filtros corregidos en fase.

- UNE-EN ISO 13565-2

Esta norma establece el procedimiento de determinación de los parámetros que describen el aumento de porcentaje de material, en función del nivel de profundidad del perfil de

rugosidad, obtenidos a partir de la representación lineal de la curva de tasa de material.

- UNE-EN ISO 13565-3

Esta normativa aporta información sobre la curva de probabilidad de material, la forma de poderla determinar y los cálculos de sus parámetros.

- BS EN ISO 25178-2:2012

Esta norma, todavía en desarrollo, recoge los términos, definiciones y parámetros para la determinación del estado superficial en los análisis en tres dimensiones. Además, incluye información relativa a la tasa de material a partir de la representación de la curva de tasa de material.

5.2. Tipos de perfil

Para estudiar y crear sistemas de evaluación del estado de superficies, previamente hay que definir una serie de conceptos que tienen relación con una serie de perfiles sobre los cuales se extrae información de la superficie a estudiar:

- Perfil real: Es el perfil que resulta de cortar una superficie real por un plano perpendicular a dicha superficie.
- Perfil efectivo: Se trata de una imagen aproximada de un perfil real obtenido por medio de evaluación o medición. Este perfil es función de las características geométricas y físicas del instrumento de medición y de la técnica empleada. Se diferencia del perfil real por una cierta deformación causada por la imprecisión del aparato y el método de palpación.

Dichos perfiles se pueden observar en la *Figura 13*. Tal y como está indicado, se observa como el perfil efectivo tiene unas limitaciones que vienen dadas por el radio del palpador.

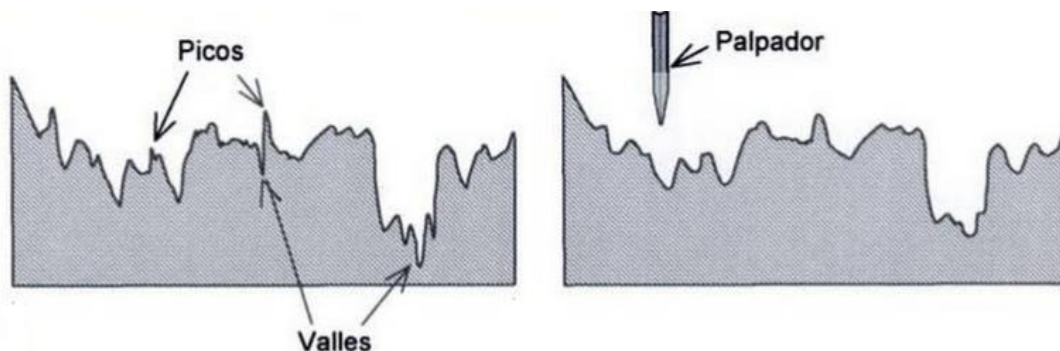


Figura 13. Perfil real (izquierda) y perfil efectivo (derecha)

Este perfil efectivo procedente del medidor puede pasar por diferentes filtros para eliminar tanto las ondulaciones (señales de baja frecuencia, o de onda larga), como las rugosidades (señales de alta frecuencia, o de onda corta). También se pueden aplicar filtros más selectivos para eliminar señales que correspondan a irregularidades particulares que pueden ser críticas en algunos casos concretos. En general, la norma UNE-EN ISO 4287:1999 habla de tres perfiles (ver Figura 14).

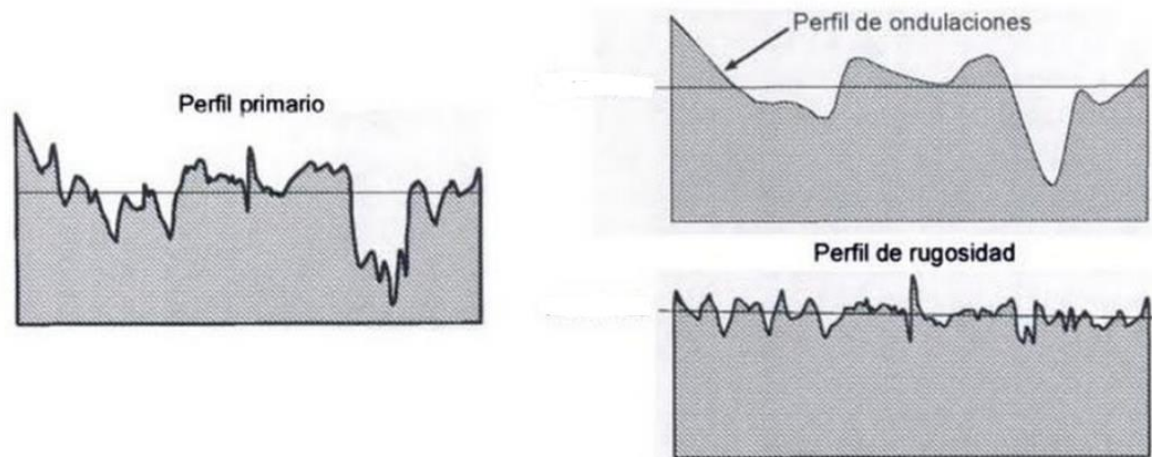


Figura 14. Perfiles procedentes del perfil efectivo a partir de la señal filtrada

- Perfil primario (P): perfil efectivo de la superficie, es la mejor aproximación al perfil real que se puede medir con el procedimiento empleado.
- Perfil de ondulaciones (W): derivado del perfil primario tras eliminar las rugosidades
- Perfil de rugosidad (R): perfil obtenido a partir del perfil primario tras la supresión de las ondulaciones.

5.2.1. Longitud de muestreo y longitud de evaluación

Antes de proceder a la descripción de cada parámetro de rugosidad, se deben explicar previamente dos conceptos. Para todo análisis debe hacerse la diferencia entre longitud de corte o de muestreo y longitud de evaluación (ver Figura 15). Como se puede observar, la longitud de evaluación es la longitud total realizada por el aparato de medida, mientras que la longitud de corte o de muestreo es una parte a estudiar individualmente de entre la longitud total. La norma DIN 4768 fija que la longitud de evaluación debe ser mayor o igual que cinco veces la longitud de corte.

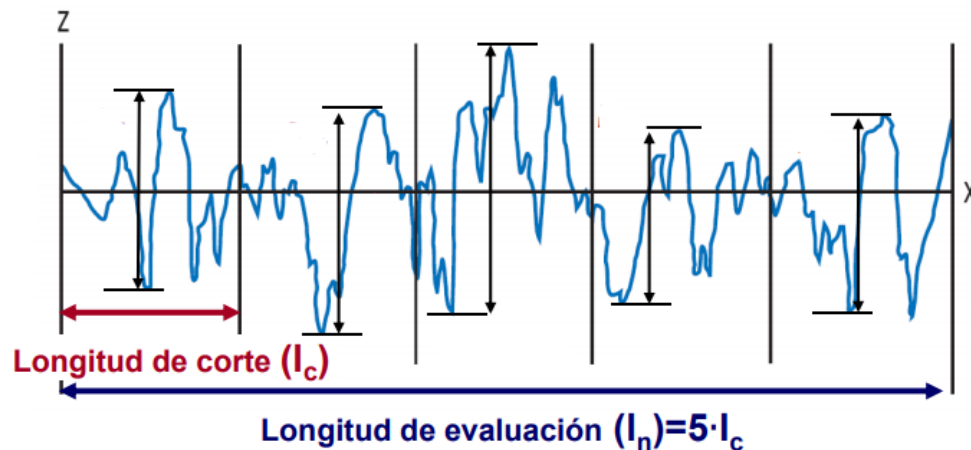


Figura 15. Longitud de corte o muestreo y longitud de evaluación

Existen parámetros de rugosidad que deben determinarse directamente sobre la longitud de evaluación. Otros, en cambio, se deben calcular para cada longitud de muestreo o corte y posteriormente hacer la media aritmética para encontrar el valor a lo largo del perfil.

Respecto los parámetros del perfil primario, la norma DIN ISO 4287:1997 establece que la longitud de muestreo es igual a la longitud de evaluación. En el caso de los parámetros del perfil de ondulación, no se establecen valores de longitud de evaluación con lo que los cálculos se realizarán sobre la longitud de muestreo.

5.3. Parámetros bidimensionales (estudio del perfil)

Para cada uno de los tres tipos de perfil existentes (primario, de rugosidad, de ondulación) existen diversos parámetros. Todos los parámetros se definen mediante un proceso unívoco. La mayoría de los parámetros tratan de medir las alturas de los picos y las profundidades de los valles, aunque existen también parámetros que determinan el grado de espaciamiento del perfil. Una característica común de los parámetros es que, a mayor número de irregularidades en la superficie, mayor es el valor del parámetro. De la misma manera que los tipos de perfiles, todos los parámetros también se definen a partir de la norma UNE-EN ISO 4287:1999.

En cada definición de un parámetro se indican tres abreviaturas para dicho parámetro, la primera letra de estas abreviaturas es:

- P: indica que el parámetro está medido sobre el perfil primario
- R: indica que el parámetro está medido sobre el perfil de rugosidad

- W: indica que el parámetro está medido sobre el perfil de ondulación

5.3.1. Parámetros de amplitud (pico y valle)

- **Máxima altura de pico del perfil, P_p , R_p , W_p :** La mayor de las alturas de los picos del perfil, Z_p , comprendida en una longitud de muestreo.

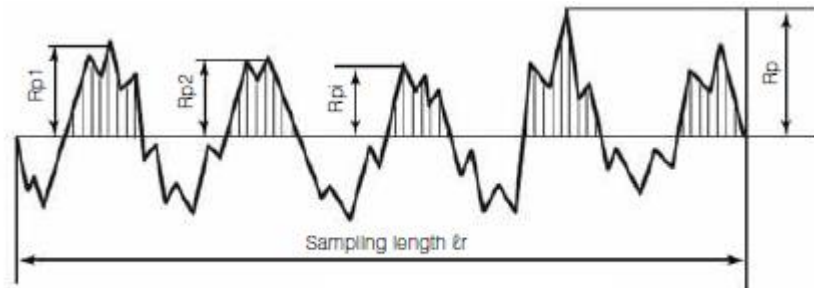


Figura 16. Máxima altura de pico del perfil

- **Máxima profundidad de valle del perfil, P_v , R_v , W_v :** La mayor de las profundidades de los valles del perfil, Z_v , comprendida en una longitud de muestreo.

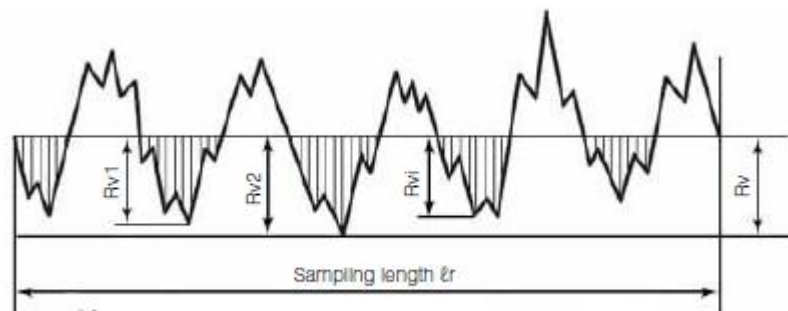


Figura 17. Máxima profundidad de valle del perfil

- **Máxima altura del perfil, P_z , R_z , W_z :** Suma de la máxima altura de pico, Z_p , y de la máxima profundidad de valle Z_v , comprendidas en una longitud de muestreo.

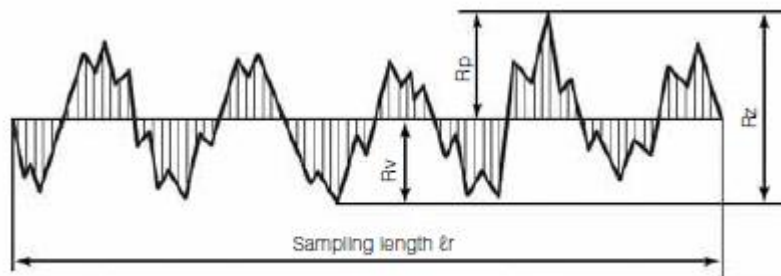


Figura 18. Máxima altura del perfil

▪ **Altura total del perfil (P_t , R_t , W_t):** Este parámetro es el resultado de la suma de la mayor altura de pico y la mayor profundidad de valle del perfil, comprendidas en la longitud de evaluación.

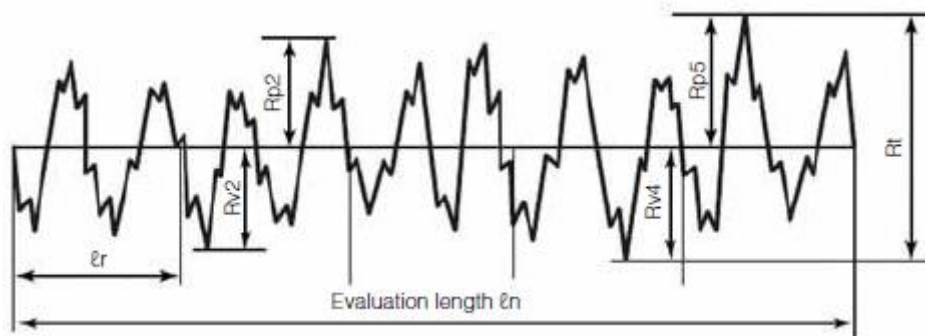


Figura 19. Altura total del perfil

5.3.2. Parámetros de amplitud (valores medios de ordenadas)

▪ **Desviación media aritmética del perfil evaluado, P_a , R_a , W_a :** Es la media aritmética de los valores absolutos de las ordenadas $Z(x)$ comprendidas en una longitud de muestreo.

$$P_a, R_a, W_a = \frac{1}{l} \cdot \int_0^l |Z(x)| \cdot dx$$

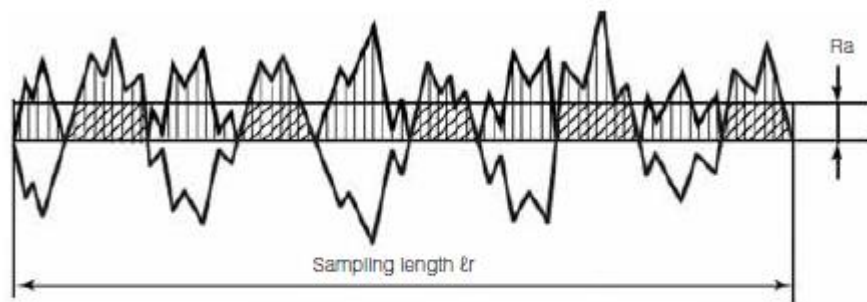


Figura 20. Desviación media aritmética del perfil evaluado

Este parámetro es el más utilizado para la determinación de un perfil y además es aplicable a la mayoría de procesos de fabricación.

▪ **Desviación media cuadrática del perfil evaluado, Pq , Rq , Wq :** Media cuadrática de los valores de las ordenadas $Z(x)$ comprendidas en una longitud de muestreo.

$$Pq, Rq, Wq = \sqrt{\frac{1}{l} \cdot \int_0^l Z^2(x) \cdot dx}$$

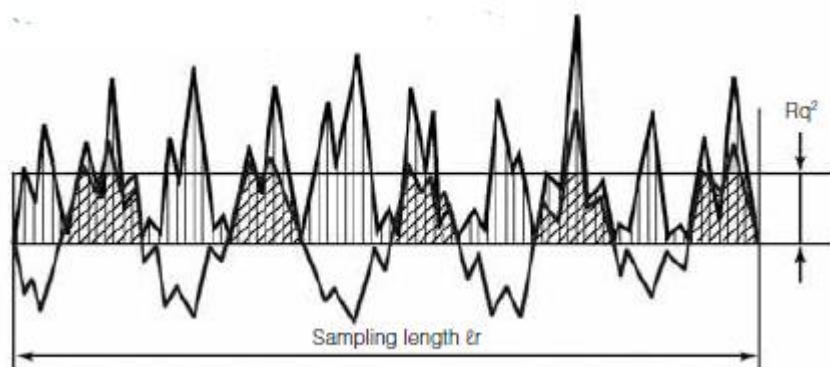


Figura 21. Desviación media cuadrática del perfil evaluado

Comparado con el valor de Ra , este parámetro tiene el efecto de dar peso extra para los altos valores. Es útil para la detección donde los picos o valles son importantes, ya que los evidencia más que el parámetro Ra .

▪ **Factor de asimetría del perfil evaluado, Psk , Rsk , Wsk :** Cociente entre la media de los cubos de los valores de ordenadas $Z(x)$, y el cubo del parámetro Pq , Rq , Wq , según el caso, dentro de una longitud de muestreo

$$Psk, Rsk, Wsk = \frac{1}{Rq^3} \cdot \left[\frac{1}{lr} \cdot \int_0^{lr} Z^3(x) dx \right]$$

Un valor positivo de este parámetro indica que la superficie está formada principalmente por valles, mientras que un perfil con este valor negativo, indica que está formado por picos y asperezas tal y como se puede ver en la *Figura 22*.

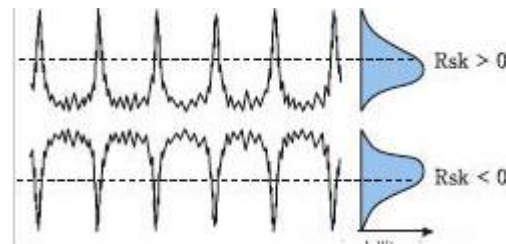


Figura 22. Comparativa entre un perfil con valor positivo y valor negativo

▪ **Factor de aplastamiento del perfil evaluado, Pku , Rku , Wku :** Cociente entre la media de los valores de las ordenadas $Z(x)$, elevados a la cuarta potencia y el valor del parámetro Pq , Rq , Wq , según el caso, elevado a la cuarta potencia, dentro de una longitud de muestreo.

$$Psk, Rsk, Wsk = \frac{1}{Rq^4} \cdot \left[\frac{1}{lr} \cdot \int_0^{lr} Z^4(x) dx \right]$$

Este parámetro sirve como criterio para valorar la nitidez de una superficie. Con un valor alto, en los picos del perfil existen pocas crestas mientras que, con un valor de parámetro bajo, existe poca nitidez, o muchas crestas, en los picos o valles del perfil.

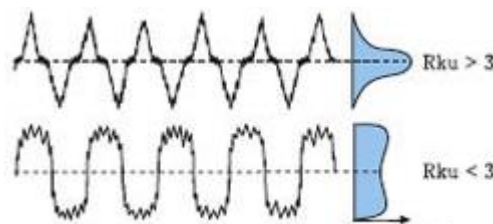


Figura 23. Comparación del parámetro Rku en el valor límite ($Rku = 3$)

5.3.3. Parámetros de espaciamento

▪ **Anchura media de los elementos del perfil, PSm , RSm , WSm :** Valor medio de las anchuras de los elementos del perfil, Xs , comprendidas en una longitud de muestreo.

$$PSm, RSm, WSm = \frac{1}{m} \cdot \sum_{i=1}^m X_{Si}$$

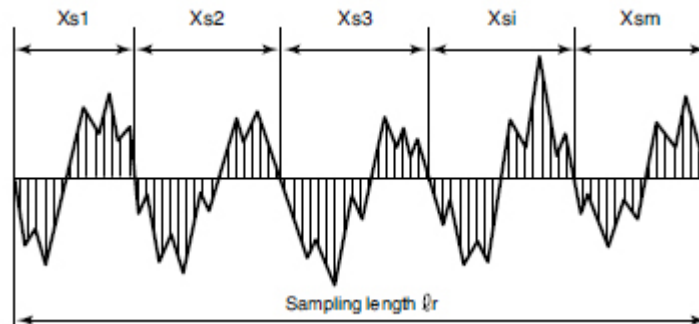


Figura 24. Anchura media de los elementos del perfil

Estos parámetros requieren que tanto las alturas como los espaciamientos sean distinguibles. Por tanto, el nivel de detección de las alturas y de los espaciamientos, vienen determinados con anterioridad. El nivel de detección de la altura debe de ser de alrededor de un 10% del valor de Pz , Rz o Wz . Por el contrario, el nivel de detección de espaciamiento debe ser de alrededor del 1% de la longitud de muestreo.

5.3.4. Curva de tasa de material (Curva de Abbott-Firestone)

▪ **Tasa de material del perfil, $Pmr(c)$, $Rmr(c)$, $Wmr(c)$:** Cociente entre la longitud del material de los elementos del perfil $MI(c)$ en un nivel dado c y la longitud de evaluación ln .

$$Pmr(c), Rmr(c), Wmr(c) = \frac{MI(c)}{ln}$$

▪ **Curva de tasa de material del perfil (Curva de Abbott-Firestone):** Curva que representa la tasa de material del perfil en tanto por ciento en función del nivel.

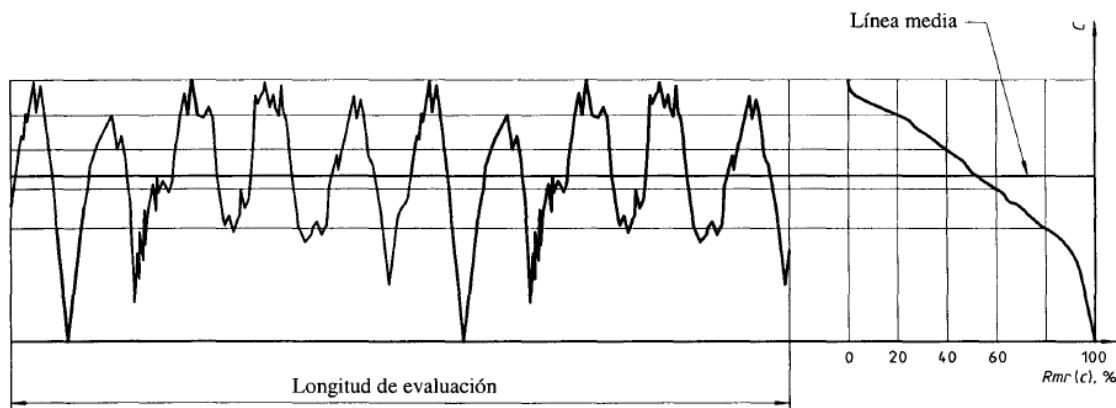


Figura 25. Dibujo del perfil (parte izquierda) y su correspondiente curva de tasa de material (a la derecha)

▪ **Curva de distribución de amplitud:** Función que representa la distribución de ordenadas $Z(x)$ dentro de la longitud de evaluación.

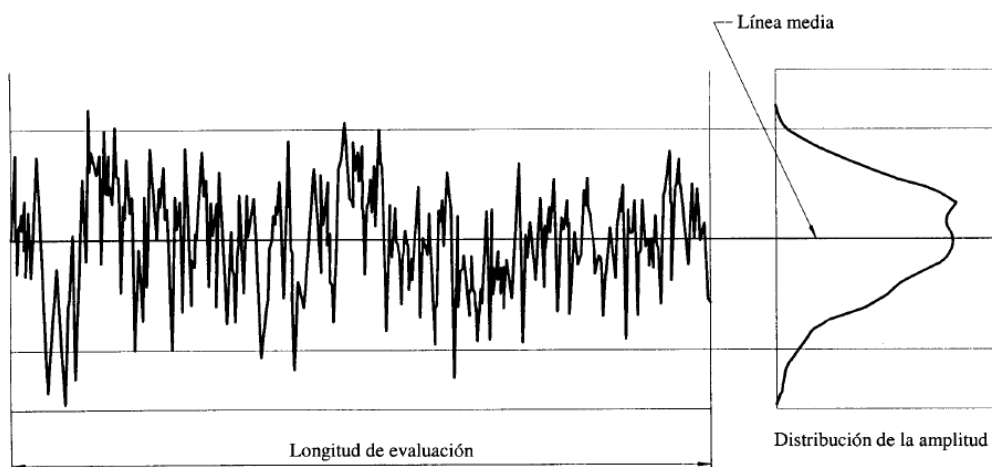


Figura 26. Dibujo del perfil (parte izquierda) y su correspondiente curva de distribución de amplitud (a la derecha)

Parámetros de la curva de Abbott-Firestone

La curva de Abbot-Firestone, representa la tasa de material del perfil en función del nivel. Dicha curva, posee una serie de parámetros que la caracterizan, y que guardan relación con los parámetros de los perfiles. En el eje de ordenadas, se sitúa una escala de valores desde cero hasta el valor Rt del perfil. El eje de abscisas está representado como una escala que va del 0% hasta el 100%.

Antes de describir los parámetros, hay que realizar una explicación visual a cerca del

significado de *perfil recortado* ya que los parámetros de la curva de Abbot se basan en este perfil.

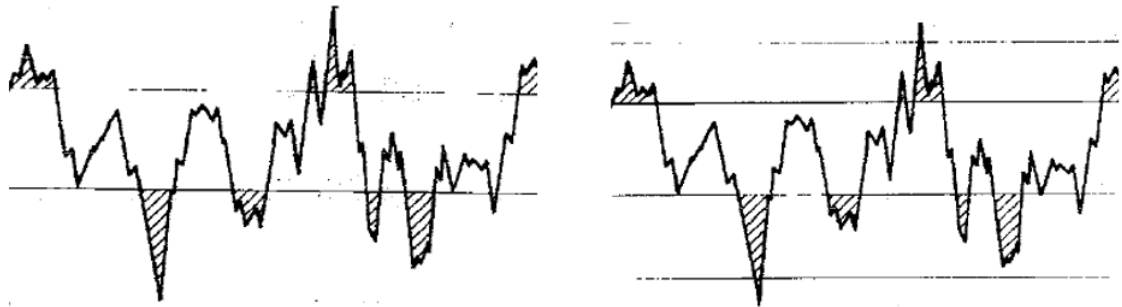


Figura 27. A la izquierda, el perfil de rugosidad y a la derecha, el perfil recortado, donde mediante dos rectas se eliminan los picos y valles profundos

Como se puede apreciar en la *Figura 27*, en el perfil recortado se eliminan tanto los picos como los valles profundos. En la norma UNE-EN ISO 1356-2 donde vienen indicados los cálculos para los parámetros de la curva de Abbot, no viene indicado el criterio para la eliminación de los picos o valles profundos. No obstante, tenerlos en cuenta o no, siempre y cuando se trate de una superficie equilibrada tanto en picos como en valles y no haya elementos destacables, no implica una gran variación en el posterior cálculo de parámetros.

Los parámetros descritos a continuación, solamente podrán ser calculados en caso de que la curva tenga forma de S, en caso contrario, dichos parámetros pueden no aportar una información correcta o no se puedan calcular en su totalidad. Por lo tanto, debido a la geometría de los perfiles, este procedimiento será mayoritariamente aplicable a los perfiles primario y de rugosidad.

La nomenclatura de los parámetros, según correspondan al perfil primario, de rugosidad o de ondulación, poseerán una *P*, *R* o *W* respectivamente, haciendo más sencilla su diferenciación, tal y como ocurre en los parámetros referentes al perfil.

- **Profundidad del perfil de rugosidad recortado, R_k :** Profundidad definida sobre el perfil de rugosidad recortado.
- **Altura de los picos eliminados, R_{pk} :** Altura media de los picos que sobresalen por encima del perfil recortado
- **Profundidad de los valles eliminados, R_{vk} :** Profundidad media de los valles situados por debajo del perfil recortado
- **Porcentaje de material, $Mr1$:** Porcentaje determinado por la línea de corte que separa

los picos altos del perfil recortado.

- **Porcentaje de material, $Mr2$:** Porcentaje determinado por la línea de corte que separa los valles profundos del perfil recortado.
- **Superficie de picos, $A1$:** Superficie delimitada por el triángulo rectángulo de base $Mr1$ y altura Rpk .
- **Superficie de valles, $A2$:** Superficie delimitada por el triángulo rectángulo de base $100\%-Mr2$ y altura Rvk .
- **Relación de material relativo al perfil de rugosidad, Rmr :** Representa la relación de material obtenida a una altura determinada. Por defecto, se considerará como el porcentaje de material a la altura de $1\mu m$ bajo el pico más alto, aunque en la normativa no viene especificado en qué punto debe calcularse.

Para el cálculo de estos parámetros, previamente se debe calcular la recta equivalente (ver Figura 28). La recta equivalente se calcula a partir de la “zona central” de la curva de porcentaje de material que incluye el 40% de los puntos del perfil. Esta zona central anteriormente mencionada se sitúa donde la secante a la curva de porcentaje de material que intercepta un arco representando el 40% del material, posee la menos pendiente. En caso de que haya varias zonas con pendiente similar, la primera hallada es la considerada como válida.

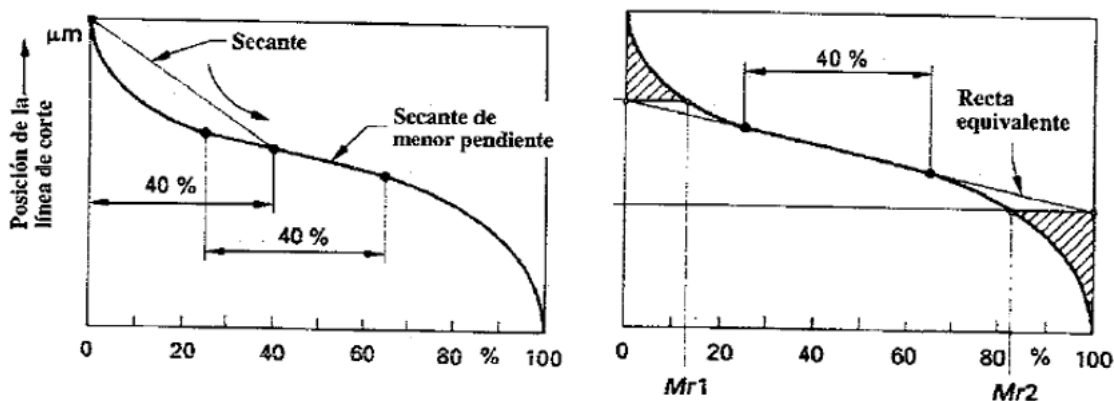


Figura 28. Gráfico donde se puede apreciar, en la parte derecha, la recta secante y la recta equivalente

Una vez se tiene calculada la recta equivalente, se conocen los puntos de corte del eje que tiene por altura el parámetro Rt en el valor de 0% y en el de 100%, dando lugar al perfil recortado, Rk . Los parámetros Rpk y Rvk son iguales a la altura de los triángulos rectángulos que tienen respectivamente la misma superficie que la zona de picos o la zona

de valles. El triángulo rectángulo correspondiente a la superficie de picos, tiene por base $Mr1$, y el correspondiente a la superficie de valles, tiene por base $100\% - Mr2$. En la Figura 29 se pueden apreciar estos parámetros.

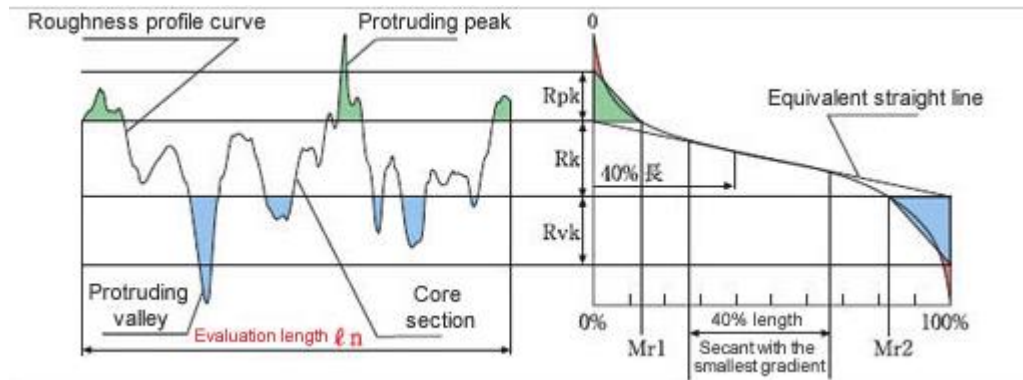


Figura 29. Representación de los parámetros de Abbott sobre la propia curva

Llegados a este punto, se puede apreciar de una forma visual las superficies A1 y A2.

5.3.5. Curva de probabilidad de material

Las características y los parámetros de la curva de probabilidad de material, vienen indicados en la norma ISO 13565-3.

Dicha curva, es la representación de la curva de porcentaje de material (curva de Abbott-Firestone) en la que el porcentaje de longitud de material se expresa como probabilidad gaussiana, en valores de desviación típica, dibujada de forma lineal sobre el eje horizontal.

La nomenclatura de los parámetros, según correspondan al perfil primario o de rugosidad, poseerán una P o R respectivamente, haciendo más sencilla su diferenciación. En la normativa, no está contemplado el cálculo de estos parámetros para el perfil de ondulación.

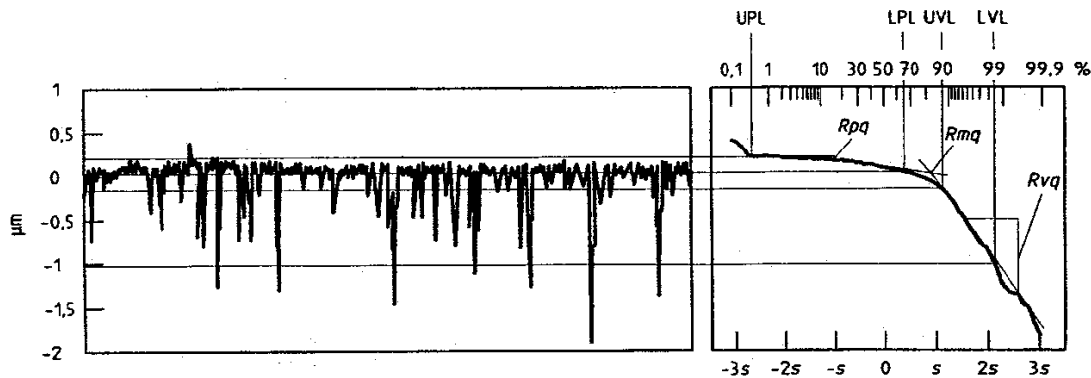


Figura 30. Perfil de rugosidad con su correspondiente curva de probabilidad de material y las zonas utilizadas en determinación de los parámetros R_{pq} , R_{vq} y R_{mq}

- **Parámetro P_{pq} , R_{pq} :** Pendiente de la curva de regresión lineal obtenida en la zona plana.
- **Parámetro P_{vq} , R_{vq} :** Pendiente de la curva de regresión lineal obtenida en la zona de valles.
- **Parámetro P_{mq} , R_{mq} :** Porcentaje relativo de material en la zona de intersección meseta-valles.

Referente a la curva de probabilidad de material, existen una serie de zonas a destacar, las cuales se pueden observar en la siguiente imagen. Como se puede observar, la escala se representa linealmente en unidades de desviación típica de una distribución normal. En esta escala, la curva de porcentaje de material de una distribución gaussiana se transforma en una línea recta. En caso de tratarse de una superficie estratificada compuesta por dos distribuciones gaussianas, la curva de probabilidad de material presenta dos rectas.

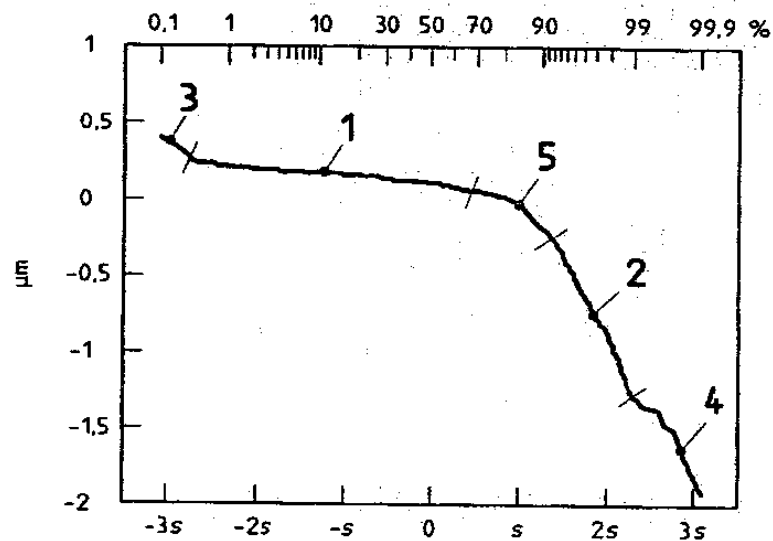


Figura 31. Curva de probabilidad de material con los puntos críticos para su evaluación indicados

Datos de la curva:

- (1) Zona plana (meseta)
- (2) Zona de valles
- (3) Picos aislados rechazables en el perfil
- (4) Ranuras profundas o valles aislados en el perfil
- (5) Zona inestable (curvatura) correspondiente a la transición de la meseta a la zona de valles, resultante de una combinación de dos distribuciones.

La eliminación de los datos (3), (4) y (5) trata de asegurar la estabilidad de los parámetros en mediciones repetidas de una superficie dada.

La curva de probabilidad de material solo es de utilidad en algunos tipos de acabado superficial, no es válida en todas las superficies.

5.4. Parámetros tridimensionales (estudio de la superficie)

En ocasiones, un estudio bidimensional de una superficie, no es suficientemente completo para su correcta determinación. Existen procesos de mecanizado, como por ejemplo el bruñido (ver Figura 32), el cual da lugar a una superficie irregular que, en caso de querer analizar el total de la superficie, se obtiene un resultado más preciso haciendo uso de los parámetros superficiales de tipo topográfico.

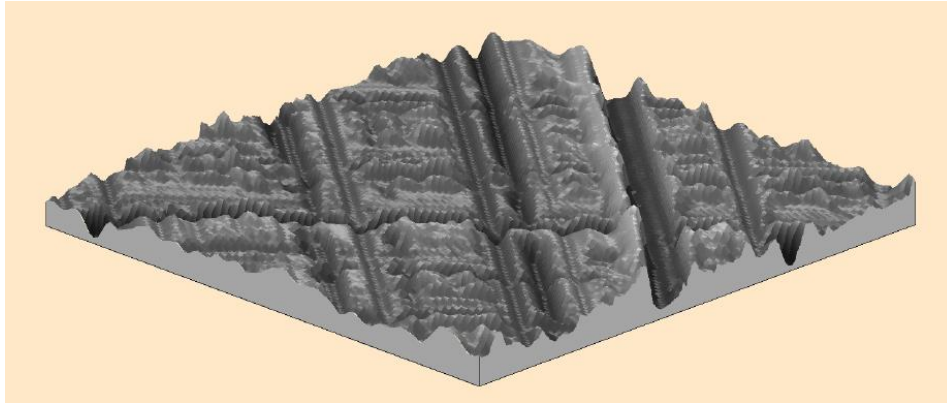


Figura 32. Imagen de la superficie obtenida a través del bruñido

Es por eso, que existen unos parámetros para el análisis en tres dimensiones con los cuales se puede llegar a hacer un estudio completo. Dicha terminología, viene determinada en la norma BS EN ISO 25178-2-2012.

Los parámetros mostrados a continuación, guardan una relación directa con los parámetros bidimensionales. Solamente se van a definir los parámetros de amplitud, es decir, los que hacen referencia los picos y valles.

- **Máxima altura de pico de la superficie evaluada, S_p :** La mayor de las alturas de los picos, S_p , comprendida en el área definida respecto al plano medio.

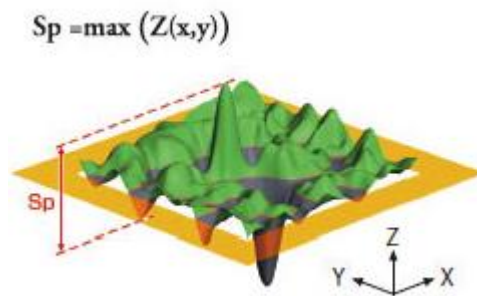


Figura 33. Máxima altura de pico

- **Máxima profundidad de valle de la superficie evaluada, S_v :** La mayor de profundidades de los valles, S_v , comprendida en el área definida respecto al plano medio.

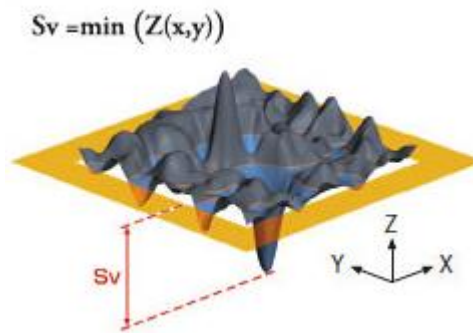


Figura 34. Máxima profundidad de valle

▪ **Máxima altura de la superficie evaluada, S_z :** Suma del valor máximo de altura y el valor máximo de valle dentro del área definida respecto al plano medio.

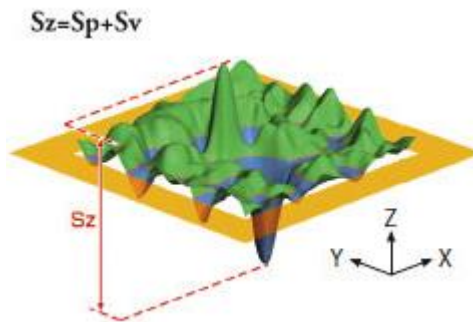


Figura 35. Máxima altura de la superficie

▪ **Desviación media aritmética de la superficie evaluada, S_a :** Media aritmética del valor absoluto de las ordenadas dentro del área definida respecto al plano medio.

$$S_a = \frac{1}{A} \cdot \iint_A |Z(x,y)| \cdot dxdy$$

Es uno de los parámetros más comúnmente utilizados. La influencia de algún tipo de defecto en la superficie de la pieza tiene poca relevancia, con lo que se pueden obtener buenos resultados.

▪ **Desviación media cuadrática de la superficie evaluada, S_q :** Valor cuadrático medio de los valores de ordenadas dentro del área definida respecto al plano medio.

$$Sq = \sqrt{\frac{1}{A} \cdot \iint_A Z^2(x, y) \cdot dx}$$

Igual que su parámetro homólogo bidimensional, éste da más importancia a los picos y los valles que el parámetro Sa al estar los valores elevados al cuadrado.

▪ **Factor de asimetría de la superficie evaluada, Ssk :** Cociente del valor medio del cubo de los valores de las ordenadas $Z(x, y)$, y el cubo de Sqk dentro del área definida respecto al plano medio.

$$Ssk = \frac{1}{Sq^3} \cdot \left[\frac{1}{A} \cdot \iint_A Z^3(x, y) dx \right]$$

Un valor positivo de este parámetro indica que la superficie está formada principalmente por valles, mientras que una superficie con este valor negativo, indica que está formada por picos y asperezas.

▪ **Factor de aplastamiento de la superficie evaluada, Sku :** Cociente entre la media de los valores de las ordenadas $Z(x, y)$, elevados a la cuarta potencia y el valor del parámetro Sq elevado a la cuarta potencia, dentro del área definida respecto al plano medio.

$$Sku = \frac{1}{Sq^4} \cdot \left[\frac{1}{A} \cdot \iint_A Z^4(x, y) dx \right]$$

Este parámetro sirve como criterio para valorar la nitidez de una superficie. Con un valor alto, en los picos de la superficie existen pocas crestas mientras que con un valor de parámetro bajo, existe poca nitidez, o muchas crestas, en los picos o valles de la superficie.

5.4.1. Curva de tasa de material (Curva de Abbott-Firestone)

Tal y como ocurre en un análisis del perfil, a partir de la superficie a estudiar, se puede extraer también la curva de tasa de material (ver Figura 36). Dicha curva representa la tasa de material de la superficie en función del nivel.

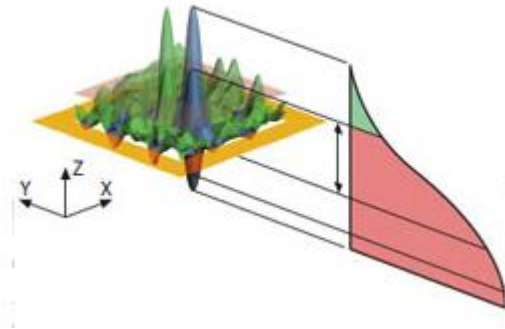


Figura 36. Curva de tasa de material de una superficie

Parámetros de la curva de Abbott- Firestone

- **Profundidad de la superficie recortada, Sk :** Profundidad definida sobre la superficie recortada.
- **Altura de los picos eliminados, Spk :** Altura media de los picos que sobresalen por encima de la superficie recortada.
- **Profundidad de los valles eliminados, Svk :** Profundidad media de los valles situados por de la superficie recortada.
- **Porcentaje de material, $Mr1$:** Porcentaje determinado por la línea de corte que separa los picos altos de la superficie recortada.
- **Porcentaje de material, $Mr2$:** Porcentaje determinado por la línea de corte que separa los valles profundos de la superficie recortada.
- **Superficie de picos, $A1$:** Superficie delimitada por el triángulo rectángulo de base $Mr1$ y altura Spk .
- **Superficie de valles, $A2$:** Superficie delimitada por el triángulo rectángulo de base $100\% - Mr2$ y altura Svk .
- **Relación de material relativo la superficie, Smr :** Representa la relación de material obtenida a una altura determinada. Por defecto, se considerará como el porcentaje de material a la altura de $1\mu m$ bajo el pico más alto, aunque en la normativa no viene indicado un punto específico para su cálculo.

El cálculo de los parámetros de la curva de Abbott, se hace de una manera análoga al procedimiento de obtención de la curva en el caso de dos dimensiones. Primeramente, se

debe calcular la recta equivalente utilizando el mismo procedimiento tal y como puede observarse en la *Figura 37*.

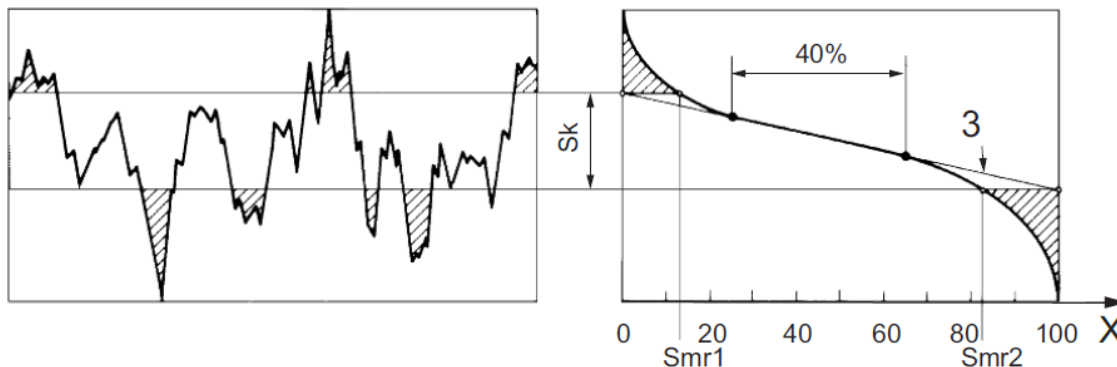


Figura 37. Recta equivalente de la curva de Abbott

Una vez obtenida la recta de mínima pendiente, se puede calcular el corte de la misma con el eje vertical, que tiene por altura el valor S_z , en los puntos de 0% y 100% para poder proceder al cálculo del resto de parámetros.

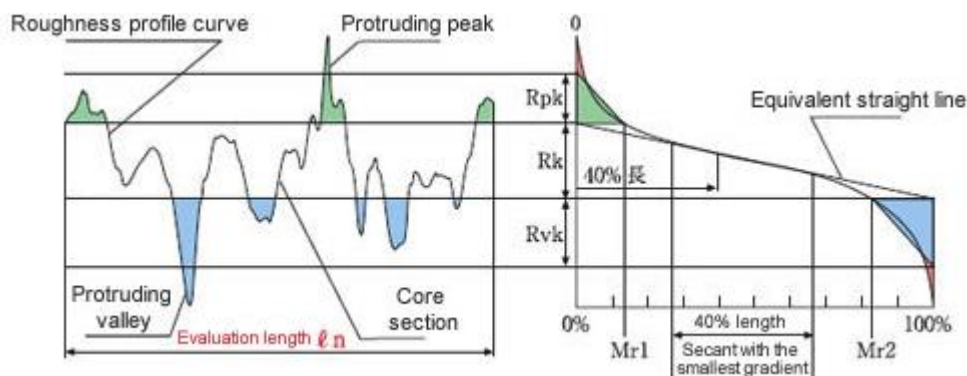


Figura 37. Representación visual de los parámetros de Abbott

La *Figura 36* y la *Figura 37* muestran un perfil en lugar de una superficie para facilitar la ilustración. El principio de la representación es el mismo tanto para un perfil como para una superficie.

5.4.2. Curva de probabilidad de material

Para el caso en tres dimensiones, la curva de probabilidad de material, tiene un funcionamiento igual que el mencionado anteriormente en el caso bidimensional, es decir, representa la curva de porcentaje de material (curva de Abbott-Firestone) en la que el porcentaje de longitud de material se expresa como probabilidad gaussiana, en valores de desviación típica.

Al tratarse de una curva análoga al caso bidimensional, los parámetros tienen el mismo significado, aunque posean una notación ligeramente distinta.

- **Parámetro Spq :** Pendiente de la curva de regresión lineal obtenida en la zona plana.
- **Parámetro Svq :** Pendiente de la curva de regresión lineal obtenida en la zona de valles.
- **Parámetro Smq :** Porcentaje relativo de material en la zona de intersección meseta-valles.

Referente a las zonas destacables de la curva, también poseen un comportamiento idéntico al caso de dos dimensiones, con lo que las zonas y los elementos prescindibles, también se comparten.

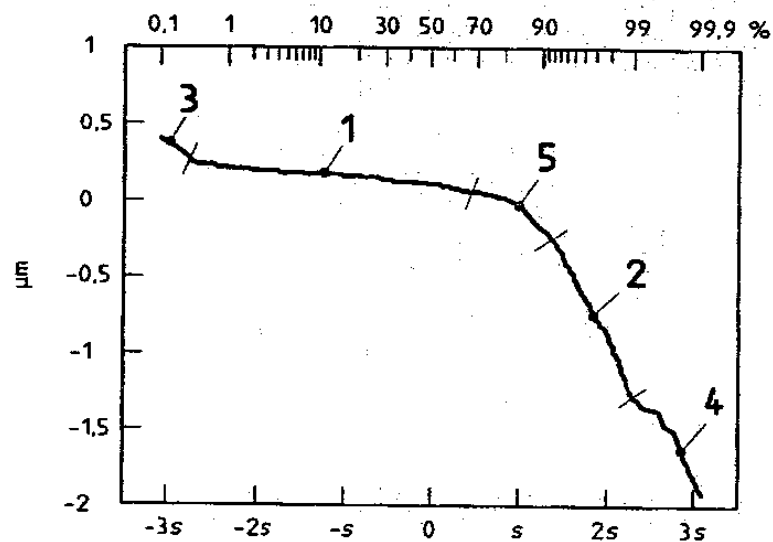


Figura 38. Puntos críticos de la curva de probabilidad de material

Datos de la curva:

- (1) Zona plana (meseta)
- (2) Zona de valles
- (3) Picos aislados rechazables en el perfil
- (4) Ranuras profundas o valles aislados en el perfil
- (5) Zona inestable (curvatura) correspondiente a la transición de la meseta a la zona de valles, resultante de una combinación de dos distribuciones.

La eliminación de los datos (3), (4) y (5) trata de asegurar la estabilidad de los parámetros en mediciones repetidas de una superficie dada.

Análogamente al caso en dos dimensiones, la curva de probabilidad de material, solamente es utilizable en algunos tipos de acabado superficial, no es válida para todas las superficies.

5.5. Filtrado de datos

5.5.1. Filtro de media móvil

Se entiende como filtro digital un algoritmo que nos permite combinar varios puntos de una señal muestreada para obtener un valor con mayor significación que los puntos individuales.

El filtro utilizado sobre los datos del perfil o superficie es un filtro gaussiano. Dicho filtro pertenece a los llamados filtros de media móvil.

Para aplicar un filtro de media móvil se toman los últimos N valores recibidos y se calcula su media. Es muy sencillo de implementar ya que el cálculo de la media únicamente requiere sumar los N elementos de la ventana y dividir por N .

El resultado es una señal suavizada que elimina parte del ruido de alta frecuencia. El número de valores N tiene una influencia en el comportamiento del filtro.

5.5.2. Filtro gaussiano

En este apartado, se va a hablar del filtro que se aplica al perfil o superficie obtenidos a partir de la medición. La aplicación del filtro, sirve esencialmente para poder eliminar tanto los errores de forma como la ondulación y de esta manera, permitir el cálculo de los perfiles de rugosidad y ondulación a partir del perfil primario.

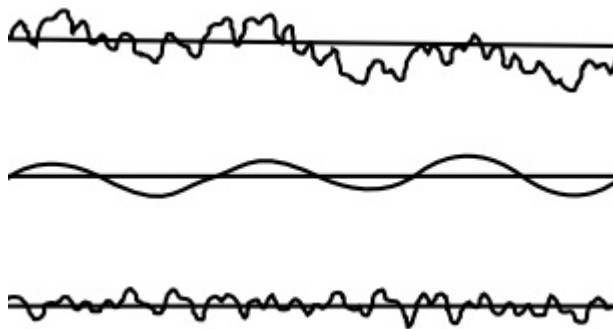


Figura 39. De arriba abajo: perfil primario, perfil de ondulación y perfil de rugosidad

Tal y como se puede observar en la *Figura 39*, el perfil primario contiene el error de forma resultante de la medición. En la parte central, se encuentra el perfil de ondulación, el cual se obtiene filtrando la señal primaria. Finalmente, en la parte inferior, se encuentra el perfil de rugosidad, obtenido a partir de eliminar las ondulaciones del perfil primario.

Según la norma ISO 11562:1996, se puede aplicar un filtro gaussiano para tal fin, cuya campana de probabilidad queda definida por la siguiente ecuación:

$$S(x) = \frac{1}{\alpha \cdot \lambda_c} e^{-\pi \left(\frac{x}{\alpha \cdot \lambda_c} \right)^2}$$

donde: $\alpha = \sqrt{\frac{\log 2}{\pi}}$ y el parámetro λ_c es un valor por defecto.

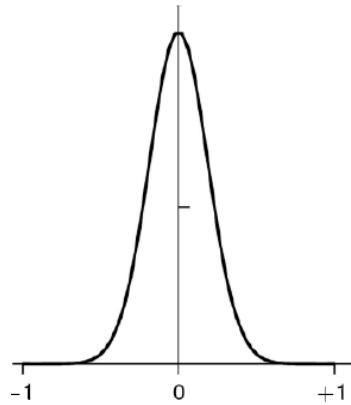


Figura 40. Función de peso del filtro gaussiano

Dicha función va recorriendo los puntos que conforman el perfil, aplicando a cada uno de ellos su peso correspondiente y de esta manera consiguiendo la señal filtrada (ver Figura 40).

Al tratarse de una función simétrica, existe un inconveniente tanto al inicio como al final de la señal, este problema se soluciona eliminando el inicio y el final de la señal filtrada, centrando el estudio en los datos centrales tal y como se puede apreciar en las imágenes de la *Figura 41* donde se excluyen los extremos delimitados por las líneas azules. Los perfiles de ondulación y rugosidad, obviarán estos extremos influidos por la función gaussiana utilizando solamente la parte central.

El procedimiento de filtrado para las superficies sigue un procedimiento muy similar. En ese caso, la campana es obtenida con la siguiente ecuación:

$$S(x, y) = \frac{1}{\beta \cdot \lambda_{xc} \cdot \lambda_{yc}} e^{-\frac{\pi}{\beta} \left[\left(\frac{x}{\lambda_{xc}} \right)^2 + \left(\frac{y}{\lambda_{yc}} \right)^2 \right]}$$

donde: $\beta = \frac{\ln 2}{\pi}$ y los parámetros λ_{xc} y λ_{yc} son valores por defecto.

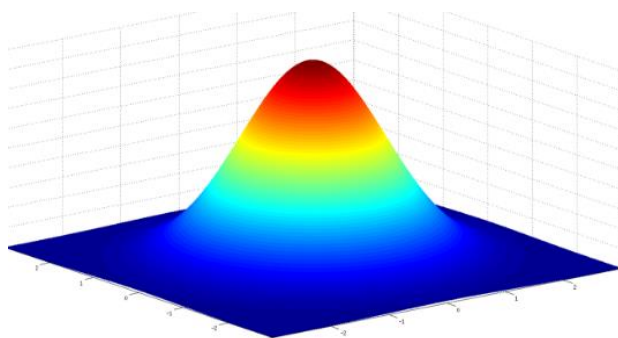


Figura 42. Aspecto de la función para el análisis de archivos en tres dimensiones

Con esta función (ver Figura 42), ocurre el mismo problema que en los filtrados bidimensionales. Se debe recortar la señal filtrada por cada uno de los cuatro extremos del plano debido a la simetría de la campana quedando así un plano filtrado de menores dimensiones que el original.

6. Sistemas para la medición de la rugosidad

En la actualidad, existen varios tipos de procedimientos para medir la rugosidad de la superficie. A continuación, se van a detallar algunos de los más importantes, haciendo una diferenciación entre aquellos que realizan la medición en contacto con la muestra y aquellos que la realizan sin contacto directo.

6.1. Sistemas de medición de la rugosidad con contacto

6.1.1. Sistemas basados en palpador

Esta tecnología es la más utilizada en la industria y es en la que está basada la mayor parte de las normas que regulan la medición de la rugosidad (ver Figura 43). A pesar de ser una de las tecnologías más desarrolladas, no impide que presente ciertas desventajas.

Para una correcta medición con este tipo de instrumentos, el contacto entre el palpador y la superficie debe realizarse con una presión y velocidad adecuada y con precisión, para evitar que se produzca una medición incorrecta. La fuerza ejercida por el palpador sobre la superficie, también debe ser controlada para no introducir errores en la medida. Por estos motivos, los sistemas basados en palpador, suelen ser utilizados en un entorno controlado, como puede ser un laboratorio.

En este tipo de mediciones, el radio del palpador también afecta a la medición. A medida que se aumenta su tamaño, actúa como una especie de filtro, descartando los detalles más pequeños e influyendo en los resultados de los valores de los parámetros calculados.

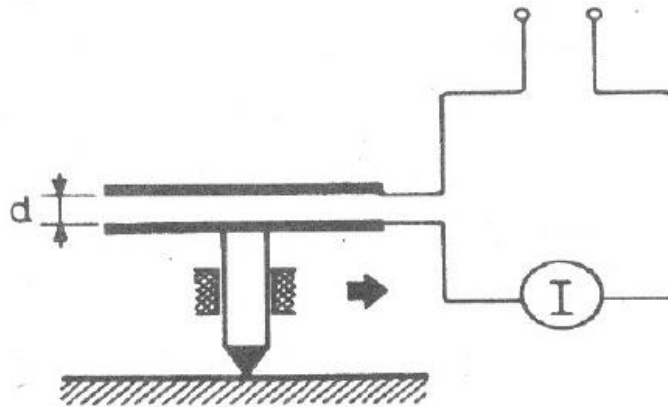


Figura 43. Principio de funcionamiento de los sistemas de medición basados en palpador; el propio palpador se mueve en contacto con la superficie dando lugar a la medición de la rugosidad

6.2. Sistemas de medición de la rugosidad sin contacto

Para optimizar la medición de la rugosidad, se están desarrollando sistemas para la medición de las superficies sin contacto.

Respecto a los sistemas sin contacto, se pueden diferenciar entre dos tipos: los que no realizan una reconstrucción de la topografía de la superficie y los que sí que la realizan.

Los primeros, realizan una estimación de los parámetros de rugosidad y ondulación en función de varias propiedades. Los parámetros resultantes de estas mediciones suelen ser limitados con lo que el estudio puede resultar incompleto. Otro punto en su contra, es que solamente permite el cálculo de parámetros referentes a valores medios, con lo que no es posible realizar un estudio de defectos puntuales. Los sistemas que realizan la reconstrucción topográfica, en cambio, sí que permiten el análisis completo de la superficie.

6.2.1. Medición por iluminación de la superficie

Este tipo de medición, se basa en la reflexión que provoca una superficie, en función de su rugosidad, al ser iluminada oblicuamente con una fuente. Al utilizar este tipo de iluminación, los puntos de la superficie que son opuestos entre la fuente de luz y la cámara producirán zonas de baja luminosidad y, en cambio, las zonas que son favorables a la reflexión producirán puntos brillantes (ver Figura 44).

Este sistema permite el cálculo del parámetro Ra en un rango entre $1\mu m$ y $3\mu m$ aproximadamente, pero no obtiene una representación real de la superficie, con lo que no

es útil para obtener el resto de parámetros que caracterizan la superficie.

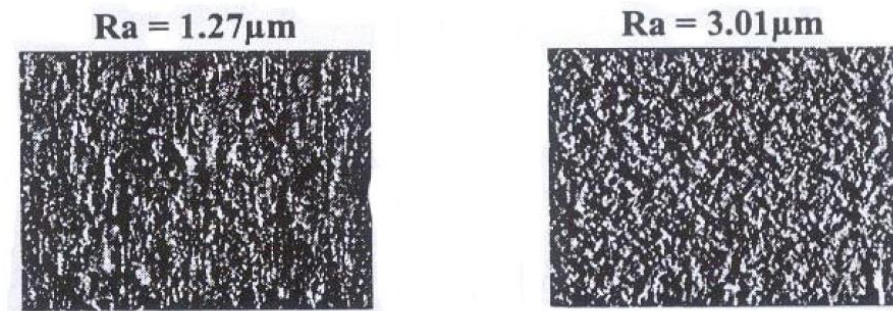


Figura 44. Imágenes de dos superficies con diferentes rugosidades, iluminando oblicuamente la superficie

6.2.2. Interferometría³ Speckle

Este método, utiliza las propiedades estadísticas de los patrones de Speckle para hacer una estimación de la rugosidad de la superficie. Dichos patrones aparecen al iluminar una superficie estática con una fuente coherente, lo que provoca una dispersión de la luz dando lugar a imágenes que tienen unos puntos más brillantes que otros; esto es debido a la propia rugosidad de la superficie.

El método consiste en estudiar el patrón de Speckle y sus propiedades estadísticas estableciendo una relación entre éstas y la rugosidad de la superficie. De esta manera, se pueden estimar los parámetros Rq y Ra que definen la superficie. Como es un método que no realiza una reconstrucción real de la superficie, sino una estimación de parámetros, no es posible obtener más parámetros.

Si se varían los ángulos con los que se observa la superficie o el ángulo de iluminación, la configuración de los patrones también cambia. Esto provoca una dispersión en las mediciones que lo hacen poco operativo para procesos industriales.

En la *Figura 45* se pueden observar los patrones de Speckle para cuatro superficies distintas mientras que en la *Figura 46* se puede ver el montaje necesario para la medición de la rugosidad.

³ La interferometría es una familia de técnicas que consisten en combinar la luz (u otras ondas electromagnéticas) proveniente de diferentes receptores, telescopios o antenas de radio para obtener una imagen de mayor resolución.

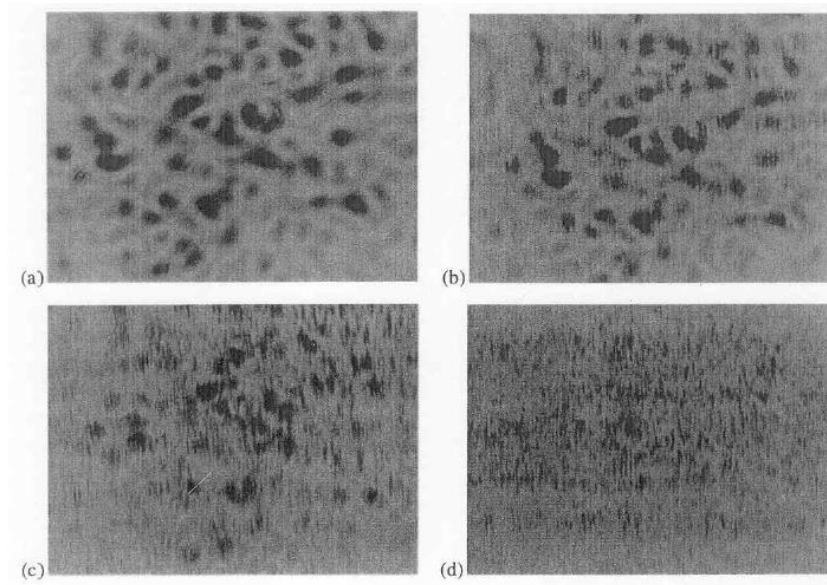


Figura 45. Imágenes de los patrones de Speckle de cuatro superficies con diferentes rugosidades. A) oblea de silicio ($R_a < 10\text{nm}$), b) superficie metálica ($R_a = 25\text{nm}$), c) superficie metálica ($R_a = 50\text{nm}$), d) superficie metálica ($R_a = 100\text{nm}$)

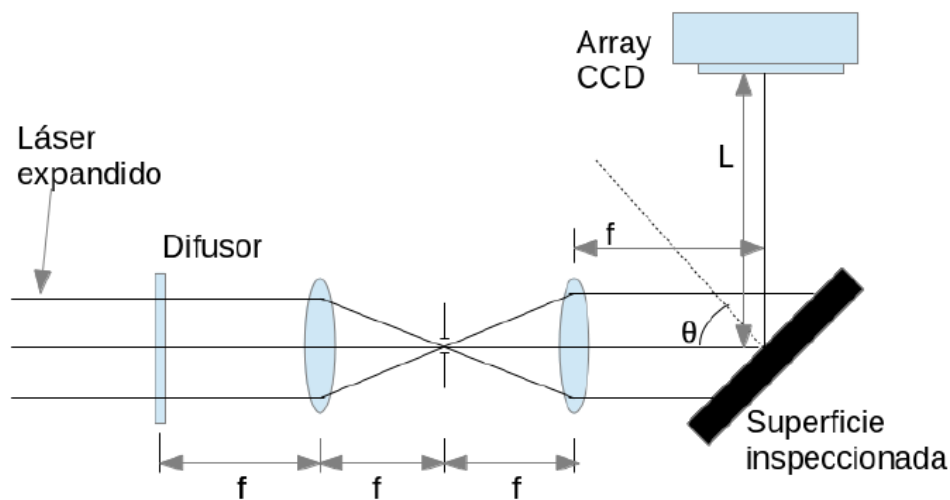


Figura 46. Montaje para la medición de la rugosidad a través del patrón de Speckle. El sistema utiliza una iluminación láser, que se proyecta sobre la superficie en estudio, la reflexión del rayo láser es recogida por un sensor CCD⁴ dando lugar a las imágenes

⁴ Circuito integrado con diminutas células fotoeléctricas que registran la imagen.

6.2.3. Triangulación láser con microscopio

La triangulación láser, es una técnica utilizada para la reconstrucción de formas a través de la medición de perfiles de la superficie. La tecnología permite reconstruir con la resolución adecuada la topografía de la superficie, pero al utilizar una lente de microscopio la distancia de trabajo es muy pequeña, del orden de unos pocos milímetros, y la profundidad de campo es menor que un milímetro (ver Figura 47). Esto hace que el equipo no resulte adecuado para su uso industrial donde es muy difícil asegurar la posición de la superficie.

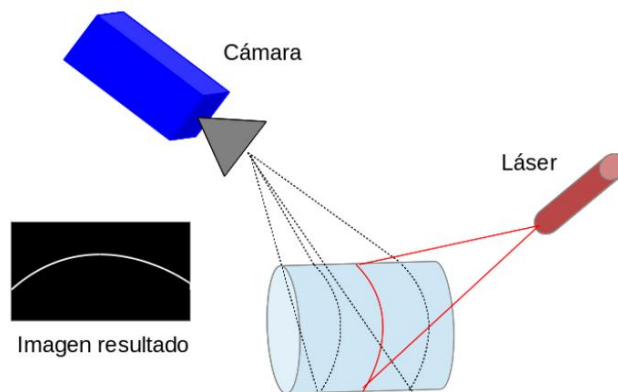


Figura 47. Principio de funcionamiento de la triangulación laser; se proyecta sobre la superficie una línea láser que se deforma debido a la geometría de la misma. La imagen resultante se trata para reconstruir la geometría de la superficie

6.2.4. Interferometría de desplazamiento de fase

Esta técnica combina un sensor de interferometría con desplazamiento de fase con un microscopio para el escaneo de superficies tanto transparentes como opacas. Este sistema permite una reconstrucción completa de la topografía de la superficie.

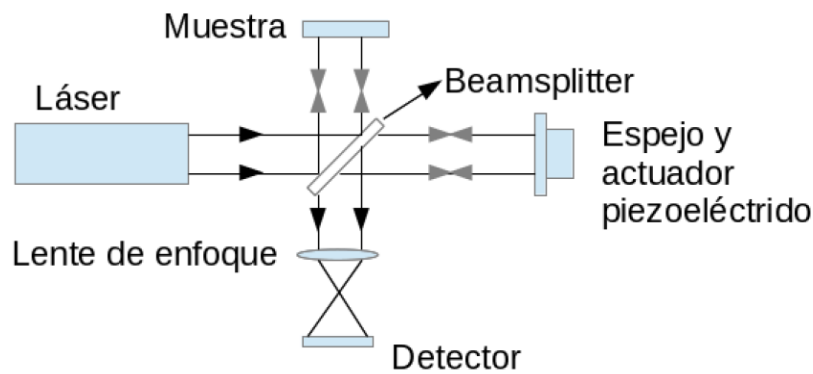


Figura 48. Esquema de un interferómetro de desplazamiento de fase

La *Figura 48* muestra el esquema de funcionamiento de un interferómetro de desplazamiento de fase, donde se puede ver el generador láser; un divisor del rayo, en el centro, que divide el rayo incidente en el rayo de referencia y el rayo que se proyecta en la superficie que se está examinando; la superficie en estudio, en la parte superior; el espejo, que se puede acercar y alejar de forma precisa y en la parte inferior, se encuentra el sensor en el que se forman los interferogramas.

6.2.5. Interferometría con luz blanca

Para la medición, se utiliza una fuente de luz coherente. Es muy importante tener un buen contraste en las franjas de interferencia, por lo que la distancia a las diferentes muestras a medir se varía. El mayor inconveniente de este sistema es que solamente se puede realizar la medida de un punto cada vez, y además, implica una cantidad importante de cálculos. En la *Figura 49* se puede ver el esquema de su funcionamiento.

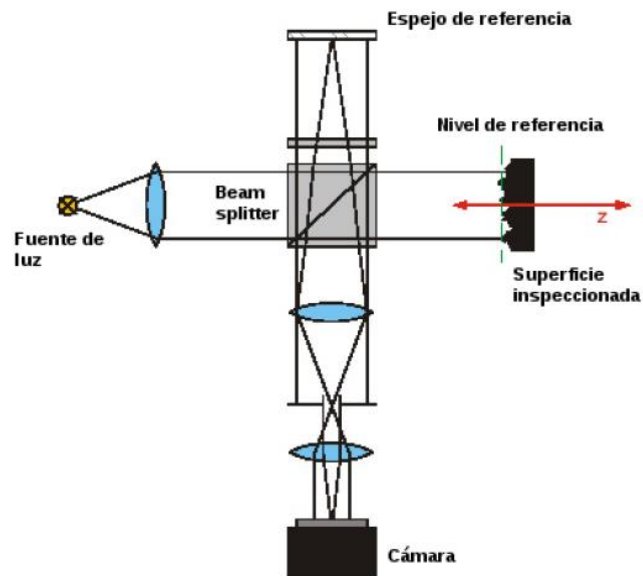


Figura 49. Esquema de un interferómetro de luz blanca

6.2.6. SORM: Superfast Optical Roughness Measurement

El SORM es un perfilómetro diseñado para la medición de la rugosidad en líneas de alta velocidad. Este sensor, consta de un conjunto de fotodetectores distribuidos en una semicircunferencia y un rayo láser tal y como se puede apreciar en la Figura 50.

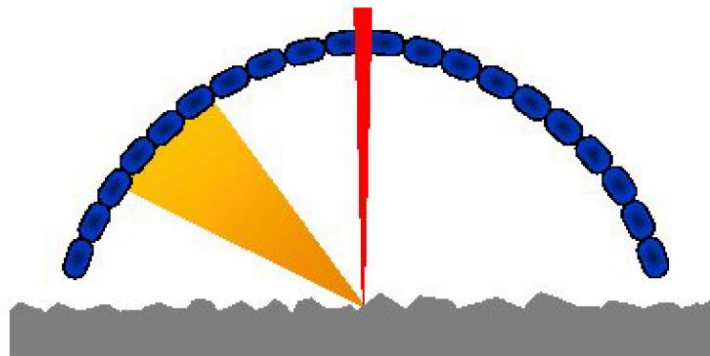


Figura 50. Estructura del sensor SORM con los fotodetectores distribuidos en una semicircunferencia y el haz láser incidiendo perpendicularmente a la superficie

El principio de funcionamiento consiste en la medición del ángulo de reflexión de un haz láser sobre la superficie. Con esto, se puede obtener la inclinación de la superficie en cada punto. Cada parte de la superficie refleja una porción de luz y el sensor recoge esta reflexión, con lo que se puede calcular la pendiente de la superficie en cada punto. Una vez

obtenida la inclinación, se puede reconstruir de manera indirecta el perfil para el cálculo de los parámetros.

6.2.7. Medición Confocal

Este sistema consiste en iluminar la superficie con un punto láser y enfocararlo a través de un sistema óptico, la reflexión del punto se hace pasar por un orificio de iluminación y la luz resultante es capturada por un sensor (ver Figura 51). Este método implica una exploración vertical para cada punto, con lo cual resulta lento haciéndolo poco apto para su uso en una línea de producción industrial.

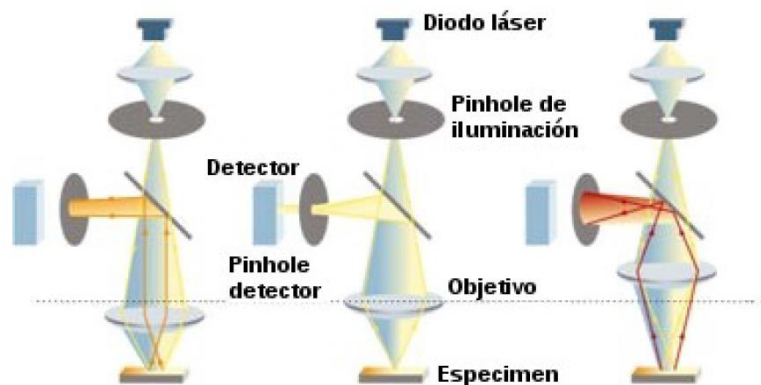


Figura 51. Principio de funcionamiento de un medidor de rugosidad Confocal

6.2.8. Elipsometría

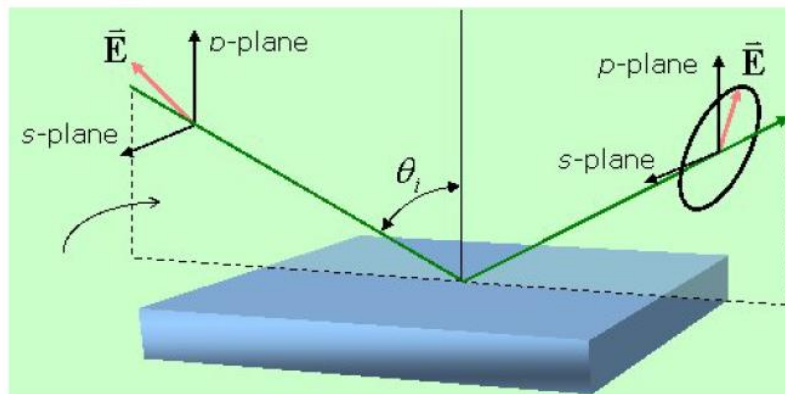


Figura 52. Principio de funcionamiento de un elipsómetro

En el esquema de funcionamiento de la Figura 52, el láser genera un haz que se hace pasar a través de un polarizador para tener una onda polarizada plana, a continuación, el haz atraviesa un retardador de un cuarto de onda dando lugar a una onda con polarización

elíptica, este haz se proyecta sobre la superficie que deformará su polarización en función de las características de la misma. Esta tecnología ofrece una elevada resolución a la hora de reconstruir la topografía de una superficie.

7. Relación proceso/acabado superficial

Según el tipo de proceso de fabricación, los acabados superficiales varían enormemente. Por ejemplo, una pieza procedente de forja no presenta el mismo acabado superficial que una pieza mecanizada. Elegir un proceso que sea capaz de lograr el acabado superficial deseado no siempre es tarea fácil, a veces, es necesario aplicar más de un proceso para lograrlo.

En la siguiente tabla, a modo de comparación, se van a indicar los valores más típicos del parámetro R_a de rugosidad para diferentes procesos de fabricación de piezas por arranque de viruta, ya sea para tanto para procedimientos estándar de fabricación como para procedimientos específicos de acabado, no tan comunes. Estos valores presentados a continuación estructurados en una tabla, proporcionan unos intervalos orientativos.

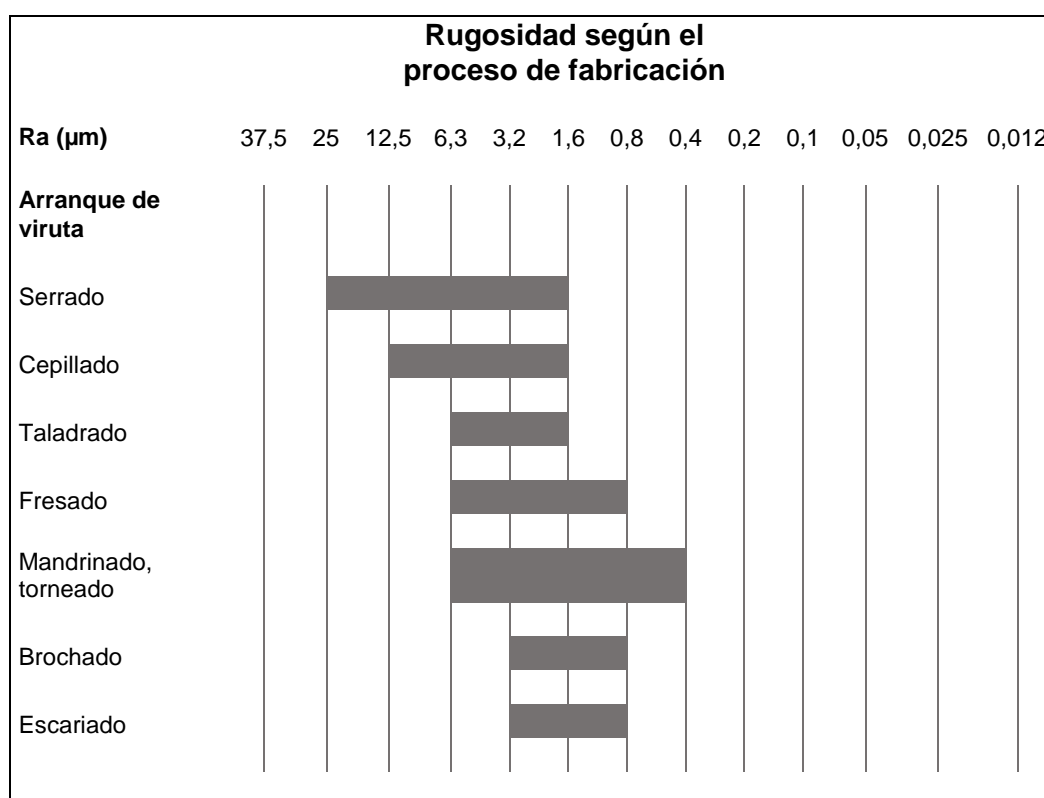


Tabla 1.1. Intervalos aproximados de valores de R_a en función del método de fabricación

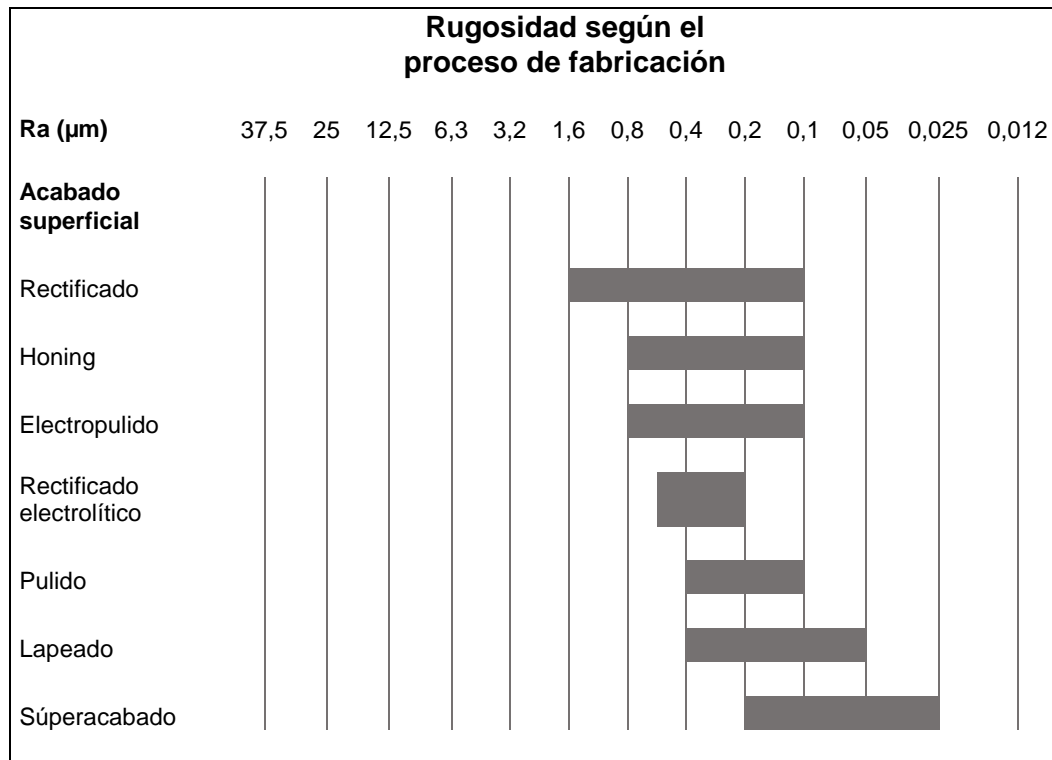


Tabla 1.2. Intervalos aproximados de valores de Ra en función del método de fabricación

Como se puede observar en la *Tabla 1.1* y la *Tabla 1.2*, los procedimientos más convencionales de fabricación por arranque de viruta, tienen una rugosidad en un intervalo de valores entre $6,3 \mu\text{m}$ y $0,4 \mu\text{m}$. Una vez pasamos a los procedimientos que ofrecen un acabado superficial más refinado, se observa que los valores de rugosidad son inferiores.

8. Programa

8.1. Objetivos del programa

Esta memoria, tiene como objetivo principal, el desarrollo de un software informático capaz de analizar distintos ficheros obtenidos de una medición de la superficie de una muestra, con el fin de conocer diversos parámetros.

Retomando de nuevo los objetivos principales del proyecto, el programa debe cumplir con lo siguiente:

- 1) Debe permitir el estudio de varios archivos a la vez siempre y cuando tengan el mismo formato de entrada de datos.
- 2) Se deben contemplar varios formatos de entrada de los datos para los ficheros .txt para de esta manera, tener más versatilidad en los análisis.
- 3) Los resultados más esenciales de los parámetros de rugosidad deben darse en un único archivo para el conjunto de ficheros analizados.
- 4) Los resultados de cada fichero deben mostrarse en un documento resumen.
- 5) Debe ajustarse a la normativa actual en el cálculo de la rugosidad
- 6) Se debe dar la posibilidad a modificaciones en el futuro.

8.2. Qué ofrece el programa en función del tipo de estudio

El programa proporciona un análisis a partir de un archivo de datos que representa la superficie de una muestra. Según si el programa trabaja en dos dimensiones o tres, se realiza el estudio sobre el perfil o sobre la superficie. A continuación, se va a enumerar la información ofrecida por el programa según el tipo de estudio realizado.

Para el caso bidimensional, proporciona lo siguientes resultados:

- Documento resumen con la información del lote de archivos analizados.
- Documento resumen para cada fichero que incluye sus parámetros del perfil de rugosidad, los parámetros pertenecientes a la curva Abbott y las gráficas del perfil de rugosidad y su curva de Abbott correspondiente.

- Tanto para el perfil primario, como para el perfil de ondulación y de rugosidad, se proporciona un documento con sus parámetros, un documento con las coordenadas que forman el perfil y una gráfica del propio perfil.
- Referente a la curva de Abbott asociada a cada uno de los tres perfiles, se proporciona un documento con sus parámetros, un documento con las coordenadas que forman la curva, un documento con las coordenadas de la curva de distribución de amplitud y una gráfica de la propia curva. Dicha gráfica, solamente está disponible para el perfil de rugosidad.

Referente al estudio en tres dimensiones, solamente se realiza el estudio la superficie primaria, ya que el filtrado de la misma no ha sido implementado, con lo que los parámetros ofrecidos solamente hacen referencia a la ya nombrada superficie primaria. Para este caso, se proporciona la siguiente información:

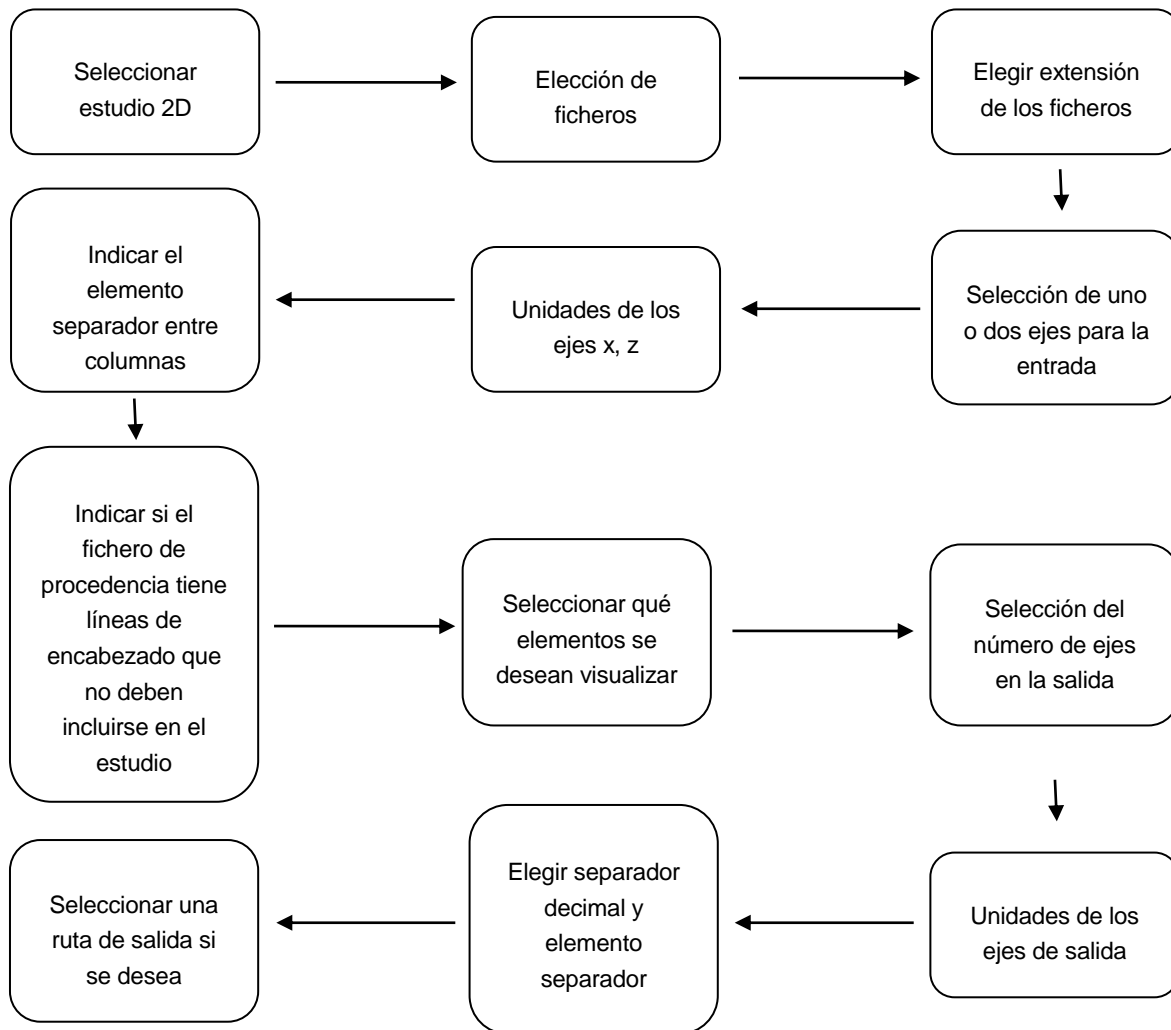
- Documento resumen con la información del lote de archivos analizados, referida a la superficie primaria.
- Para la superficie primaria de cada archivo, se proporciona un documento con sus parámetros y otro documento con las coordenadas que forman la superficie.
- Respecto a la curva de Abbott asociada a esta superficie, se proporciona un documento con sus parámetros, un documento con las coordenadas que forman la curva y una gráfica de la propia curva.

8.3. Funcionamiento del programa

El programa se ha desarrollado en lenguaje Python. Python es un lenguaje de programación interpretado cuya filosofía hace hincapié en una sintaxis que favorezca un código legible. El principal motivo de la elección del lenguaje Python, es la sencillez a la hora de la programación enfrente de otros tipos de lenguaje. Existen también muchas bibliotecas de uso libre para extender la funcionalidad básica de Python a cualquier campo. El conocimiento previo del lenguaje, hizo que al no tener que aprenderlo desde cero, se decantara la elección hacia este lenguaje. Además de todos estos motivos, hay una gran base de usuarios que hace que exista mucho código disponible en la red, con lo que encontrar ayuda o consejo cuando se precise resulta muy sencillo. Analizando todos los pros y los contras que ofrecía el lenguaje, finalmente se decidió utilizar Python.

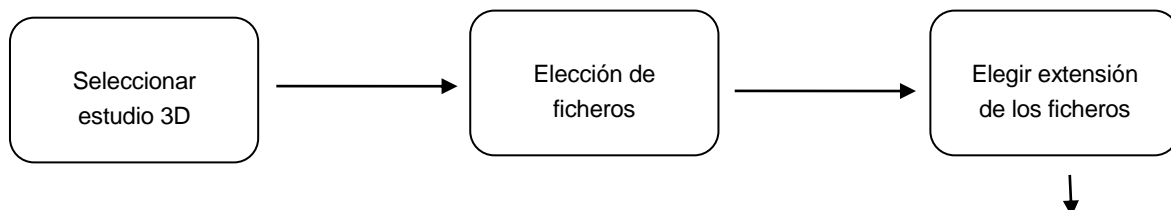
El funcionamiento del programa, al tener una estructura sencilla, se va a describir a partir de dos diagramas de bloques, uno para el estudio del perfil y otro para el estudio de la superficie.

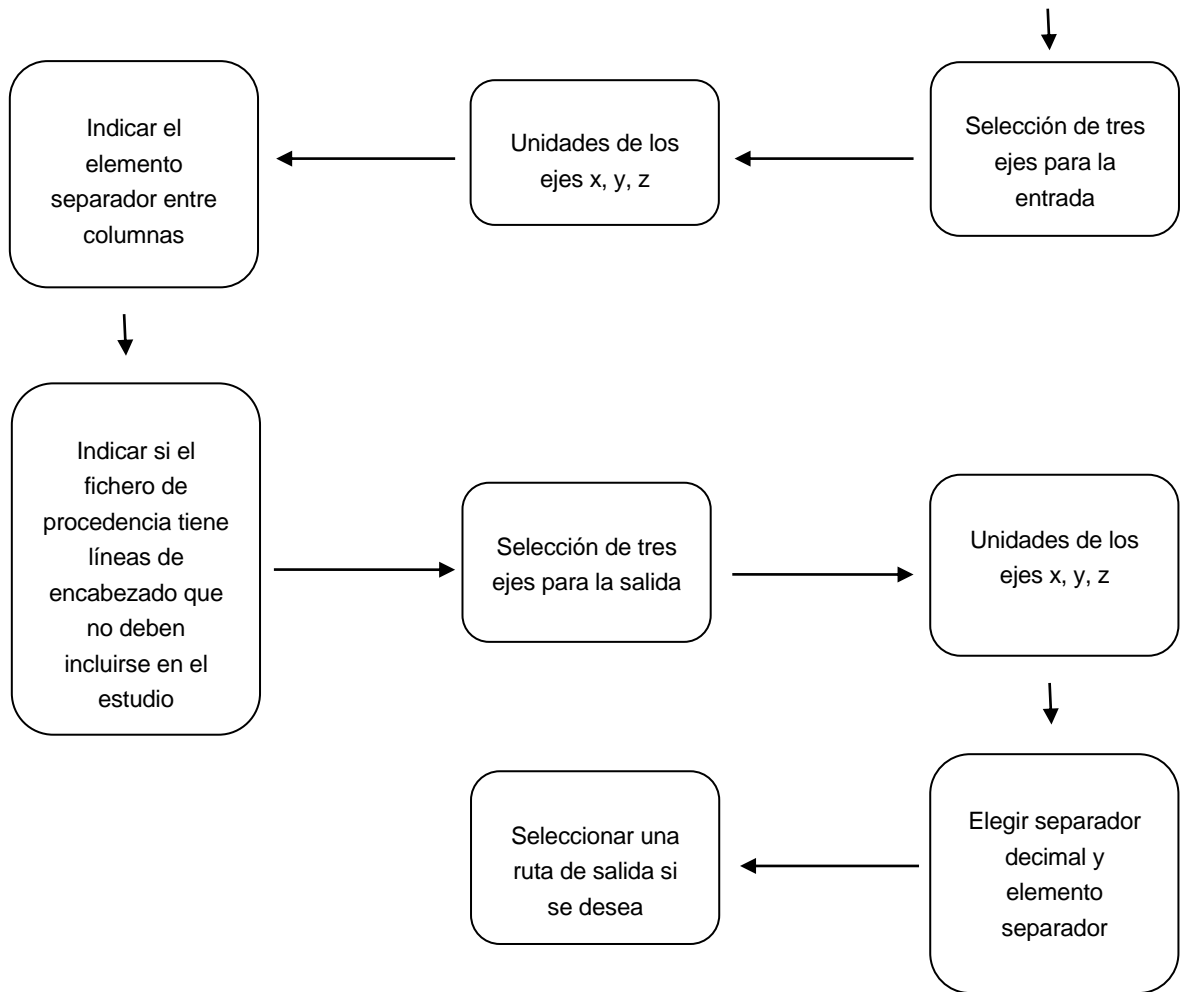
Para el caso en dos dimensiones o del perfil:



Existen varios parámetros por defecto, cuyo valor no debe modificarse en cada análisis salvo que se sea necesario. Un ejemplo pueden ser los parámetros de filtrado, la selección de los ejes o el número de líneas de encabezado.

Por el contrario, en caso de querer un análisis en tres dimensiones, el diagrama de bloques es el siguiente:





8.4. Funcionamiento de la interfaz gráfica

La interfaz está creada a partir de la librería *Tkinter*. Es una librería orientada a diseñar interfaces graficas para aplicaciones de escritorio, hecha a través del lenguaje de programación Python. Existe por la red mucha información acerca de esta librería, con lo que era un primer hecho diferenciador con otros generadores de interfaces. Destaca además por su facilidad de uso, evitando códigos complejos y permitiendo añadir botones, frases, desplegables, etc. con una gran facilidad formando así una interfaz elegante y fácil de interpretar. Otra de las ventajas que tiene es que ya está incluida en la lista de librerías de Python, con lo que no debe realizarse ninguna instalación. Ha sido escogida principalmente por su sencillez, por la gran información existente y porque es una de las más recomendadas. Después de realizar varias pruebas con alternativas a esta librería y poder compararlas o entender el funcionamiento, finalmente se decidió utilizar Tkinter.

Programa de rugosidad

Fichero/s origen

Tipo de estudio: 2D

Seleccionar fichero/s: Buscar...

Formato del fichero: .txt

Formato de entrada

Ejes: ☒ x, z ☐ z ☐ x, y, z (solo 3D)

Unidades x: mm Unidades y: mm

Unidades z: micras

Resolución x (si solamente z) [mm]: 0,00025

Elemento separador: ;

Nº líneas del encabezado: 0

Filtro y parámetros de filtrado

Tipo de filtro: Gaussiano

Pasa Altos (λ_c): 0,8

Pasa bajos (λ_s): 0,0025

Elementos de salida

☒ Primario ☒ Rugosidad ☒ Ondulación

☒ Abbott Primario ☒ Abbott Rugosidad ☒ Abbott Ondulación

☐ Prob. Primario ☐ Prob. Rugosidad ☐ Prob. Ondulación

Formato de la salida

Ejes: ☒ x, z ☐ z ☐ x, y, z (solo 3D)

Unidades x: mm Unidades y: mm

Unidades z: micras

Separador decimal: ☒ punto ☐ coma

Elemento separador: ;

Comentario en fichero de salida:

Ruta de salida (por defecto el directorio de donde procede el fichero):

Ejecutar programa

Figura 53. Interfaz del programa

Como se puede observar en la *Figura 53*, la interfaz está estructurada en cinco bloques. Cada bloque cumple una función distinta:

- **Fichero/s origen:** Esta parte de la interfaz permite escoger entre si se quiere hacer un análisis bidimensional o tridimensional. Además, permite escoger los ficheros a elegir para el análisis y está configurada para que no se repitan ficheros en el análisis. En esta parte está implementado también un desplegable que se utiliza para elegir entre diferentes formatos de fichero, no obstante, de momento, solamente permite el análisis de ficheros *.txt*.

- **Formato de entrada:** Este bloque se configura para el análisis en función de cómo están estructurados los datos en los ficheros. Permite elegir para el análisis en dos dimensiones si el fichero tiene solamente una columna con datos x o z o si por el contrario tiene solamente una columna z. En el caso de tres dimensiones, permite elegir la opción de tres ejes para el análisis.

Normalmente, las unidades de las medidas vienen dadas en milímetros o micrómetros, con lo que se permite elegir las unidades de entrada para cada dimensión.

Además, viene contemplado el elemento separador entre columnas y las líneas de

encabezado que pueda tener el fichero donde hay información no relevante para el análisis.

Sim_A30_fz0,05_Rd0,40_Sim_1_Taylor_Rap...

Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda
0.000000	0.038000	-0.392730		
0.000000	0.040000	-0.392730		
0.000000	0.042000	-0.392730		
0.000000	0.044000	-0.392730		
0.000000	0.046000	-0.392730		
0.000000	0.048000	-0.392730		
0.000000	0.050000	-0.392730		
0.000000	0.052000	-0.392730		
0.000000	0.054000	-0.392730		
0.000000	0.056000	-0.392730		
0.000000	0.058000	-0.392730		
0.000000	0.060000	-0.392730		
0.000000	0.062000	-0.392730		
0.000000	0.064000	-0.392730		
0.000000	0.066000	-0.392730		
0.000000	0.068000	-0.392730		
0.000000	0.070000	-0.392730		
0.000000	0.072000	-0.392730		
0.000000	0.074000	-0.392730		
0.000000	0.076000	-0.392730		

Figura 54. Ejemplo de formato en un fichero de entrada

En la *Figura 54*, se puede observar que se trata de un fichero de tres columnas, es decir, aporta información de una superficie. Las columnas de las x y las y están en milímetros y la columna de las z está en micras. El elemento separador entre columnas es un espacio en blanco.

▪ **Filtro y parámetros de filtrado:** Este apartado principalmente sirve para ofrecer información acerca del filtrado gaussiano para el caso bidimensional. Existe un desplegable donde se permite elegir el tipo de filtro por si en un futuro se añade otro filtrado distinto.

Para el caso tridimensional, el programa analiza el perfil primario, con lo que este apartado no añade información.

▪ **Elementos de salida:** Este bloque sirve para indicar qué información se va a mostrar una vez está terminado el análisis. Por defecto, vienen marcados los perfiles primario, de rugosidad y ondulación, además de sus correspondientes datos referentes a la curva de Abbott.

Viene indicada la opción de ofrecer información acerca de la curva de probabilidad de material, que podrá ser efectiva en caso de activarse su análisis en un futuro, aunque de momento no ha sido posible implementarla.

▪ **Formato de salida:** Este apartado ofrece la oportunidad de elegir el formato de los ficheros de salida. Permite también escribir algún comentario informativo que aparecerá en cada fichero emitido.

8.5. Estructura del programa

A continuación, se va a explicar la estructura del programa, comentando las funciones que lo forman y cuál es su funcionamiento:

- Una función principal, *def función_base()*: que se ejecuta con el botón *Ejecutar* programa que activa sucesivamente cada una de las funciones parciales que forman el programa.
- Una primera función, la función *def abrir()*: cuya función principal es la de permitir seleccionar los ficheros para el estudio. Está escrita de manera que se puedan seleccionar varios ficheros a la vez siempre y cuando tengan el mismo formato. Además, esta función se va actualizando cada vez que se añade un nuevo fichero y emite por pantalla el número de ficheros a estudiar. La configuración de esta función, imposibilita que haya dos ficheros repetidos en el mismo estudio.
- Función *def pon_en_lista()*: cuya función principal es la de leer cada línea de cada fichero y colocar sus valores *x*, *y*, *z* en una lista distinta, de donde posteriormente se tomarán los valores para el estudio.

Esta función lee línea por línea el fichero de entrada y separa los valores gracias al *elemento separador* indicado en el programa. En estos valores, se reemplaza la *coma* por el *punto* y se convierten a número real. Una vez se dispone de los números, se realiza el cambio de unidades en caso de que sea necesario y se colocan los números en su lista correspondiente, según pertenezcan a columna *x*, *y* o *z*.

En el caso de dos dimensiones, si el fichero de entrada solo proporciona valores de las alturas, crea un vector equiespaciado con la resolución indicada en el programa, a modo de columna *x*.

- Función *def regresión_lineal()*: cuya función principal es restar a las alturas del perfil o superficie, la altura obtenida al realizar la regresión *y*, de esta manera, eliminar el error de forma al modificar estas alturas.

En un estudio de dos dimensiones, la función modifica las alturas a partir de la recta de regresión encontrada mientras que en un estudio en tres dimensiones, modifica la altura a partir del plano encontrado.

- Función *def línea_media()*: cuya función es la de centrar la medición con el valor igual a 0 de las ordenadas. Para centrar el gráfico, se realiza un proceso recursivo que va subiendo o bajando la totalidad de los puntos hasta obtener el mismo número de picos que de valles. Según la normativa, este paso es necesario.

Primeramente, la función realiza una suma de todos los picos y una suma de todos los valles para detectar si el perfil está situado por encima o debajo de la línea del cero. Dependiendo de donde se encuentre, el procedimiento recursivo va subiendo o bajando con un paso dado, el gráfico hasta que la diferencia entre picos y valles sea inferior a un error dependiente del paso de búsqueda y de un coeficiente dado.

Dicho coeficiente, a base de realizar pruebas, se ha establecido en 500, ya que proporciona una buena precisión en los resultados y no compromete el tiempo de cálculo. Incrementar este paso, no proporciona más exactitud a los resultados.

Este algoritmo de línea media, se tiene que aplicar una vez se tiene corregido el error de forma con la regresión lineal y posteriormente, se tiene que aplicar por segunda vez una vez finalizada la etapa de filtrado. Una vez finalizada la regresión, aunque se deba aplicar la función, ésta no actúa ya que el número de la suma de picos es igual al número de la suma de valles.

En las dos siguientes imágenes, se puede observar el funcionamiento del algoritmo de la línea media.

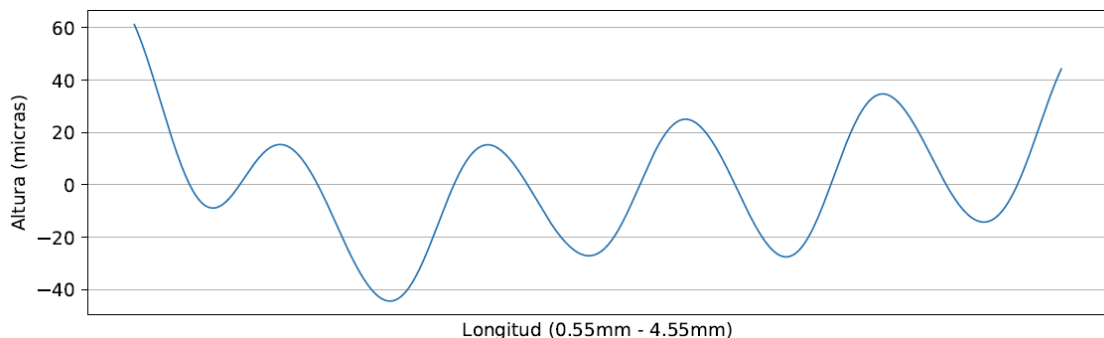


Figura 55. Perfil de ondulación con el algoritmo de la línea media activado

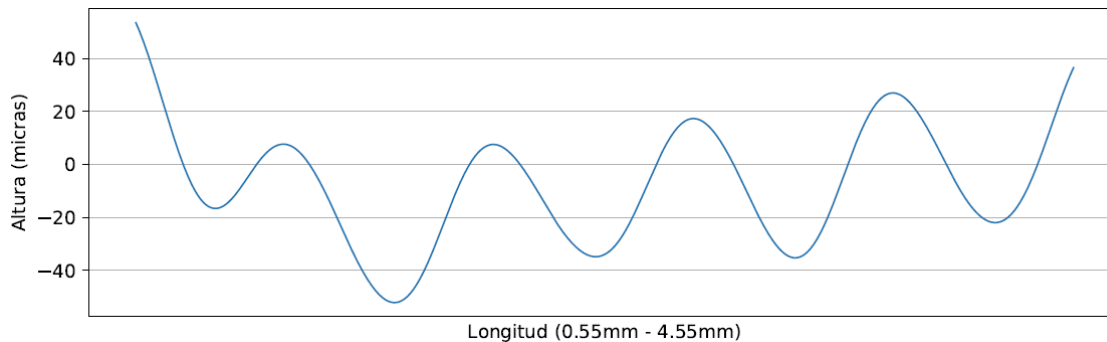


Figura 56. Perfil de ondulación con el algoritmo de la línea media no activado

En las dos imágenes anteriores, la *Figura 55* y la *Figura 56*, se puede observar el comportamiento de la función. Se aprecia como cuando no está aplicado el algoritmo, la gráfica ocupa la zona negativa de las ordenadas, mientras que cuando está aplicado, la gráfica ocupa por igual, tanto la zona positiva como la negativa.

- Función *def filtrado()*: cuya función principal es la de aplicar un filtro corregido en fase, teniendo en cuenta ciertos valores de longitudes de onda, de tal manera de poder obtener tres perfiles distintos. El filtro utilizado es un filtro gaussiano, es un tipo de filtro de media móvil.

Dicha función, primero se encarga de crear la campana, creando un vector a partir del valor de λ indicado y la resolución del perfil, es decir, del espaciamiento entre cada punto del eje x. Tal y como se indica en la teoría, la campana sigue la siguiente fórmula:

$$S(x) = \frac{1}{\alpha \cdot \lambda_c} e^{\pi \left(\frac{x}{\alpha \cdot \lambda_c} \right)^2}$$

Una vez creada la campana, esta se aplica a lo largo del perfil primario, modificando así sus valores y excluyendo los extremos. En función de la amplitud de la campana, habrá más valores o menos valores excluidos.

Aplicar esta función es un proceso largo, por ese mismo motivo se ha utilizado un compilador que acelera el paso de la campana a lo largo del perfil. Dicho compilador es *Numba*, se trata de un compilador de código abierto diseñado para actuar en funciones escritas en Python. Dependiendo fichero que se analice, puede reducir el tiempo de filtrado hasta treinta segundos.

- Función *def parametros()*: cuya función es la de genera los parámetros de cada perfil y guardarlos posteriormente en listas, a la espera de volverlos a escribir en un fichero de texto mediante las siguientes funciones.

El cálculo de los parámetros, en el perfil primario y en el de ondulación, se calculan sobre la longitud de evaluación, mientras que en el perfil de rugosidad, se calculan para cada longitud de corte y se hace una media posterior.

- Función *def curva_abbott()*: cuya función es la de generar la curva de Abbott a partir de los datos obtenidos a través del filtrado y de algunos de los parámetros calculados.

Esta función recorre el perfil verticalmente, desde R_t hasta 0, con un paso fijado en $0,1 \mu\text{m}$ y calcula el porcentaje de puntos que se encuentran por encima del valor actual. De esta forma se genera un gráfico con R_t en el eje vertical y una escala de valores que va desde 0% hasta 100% en el eje horizontal.

- Función *def distribución_amplitud()*: cuya función principal es la de generar la distribución de amplitud de los valores que conforman la curva de Abbott.

- Función *def parámetros_abbott()*: cuya función es la de generar los diferentes parámetros que tiene la curva de Abbott.

Tal y como dice la teoría, esta función crea una recta secante con la curva de Abbott que empieza en los valores de 0% y 40% y que se va moviendo hacia el valor del 100% a fin de encontrar la primera recta secante con la mínima pendiente.

Una vez encontrada la recta de mínima pendiente, se calculan los puntos de corte con el eje vertical, a fin de encontrar el valor de R_k .

Con el valor R_k calculado, se calculan las áreas A_1 y A_2 a partir de la curva obtenida y posteriormente los valores de R_{pk} y R_{vk} .

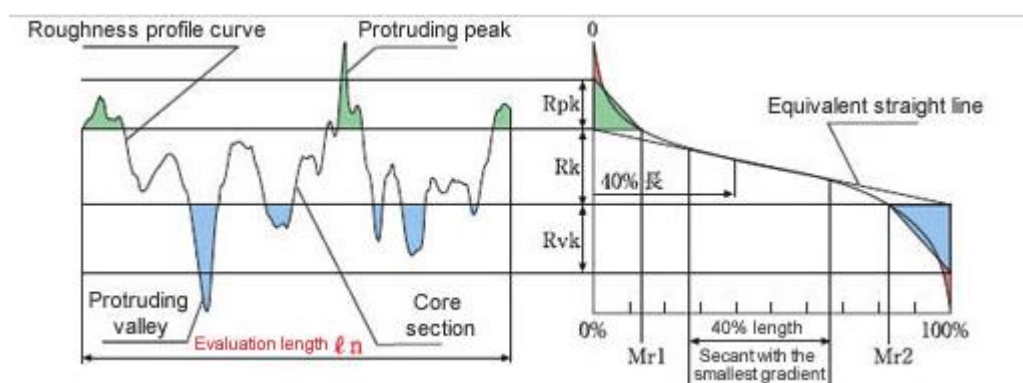


Figura 58. Curva de Abbot con su perfil correspondiente

En la Figura 58, se recuerda de forma gráfica, cuáles son las zonas de la curva de Abbott que representan los parámetros.

- Funcion *def crea_directorios()*: cuya función es la de crear las diferentes carpetas donde se van a colocar los diferentes resultados obtenidos en el estudio. Crea un árbol de directorios específico para cada fichero de tal forma que en el caso de hacer un estudio múltiple, por ejemplo, no se mezcle información.

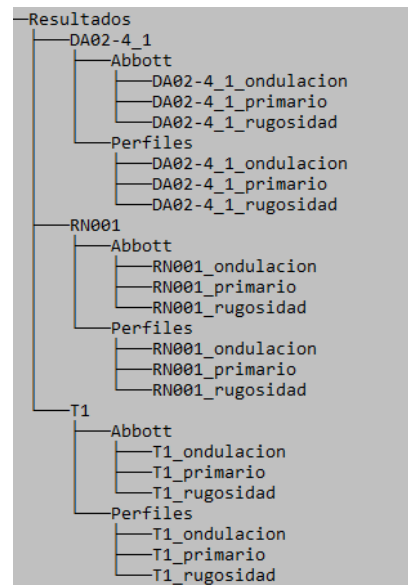


Figura 59. Árbol de directorios que se crea después de analizar tres ficheros

En la *Figura 59* se puede apreciar un ejemplo del árbol de directorios después del análisis de tres ficheros. En este caso, se realiza el análisis de los ficheros *DA02-4_1*, *RN001* y *T1*. Para cada fichero, se crean dos subcarpetas que son la carpeta *Abbott* y la carpeta *Perfiles* donde se guardan todos los parámetros y curvas, ordenadas según pertenezcan al perfil primario, de ondulación o de rugosidad.

Lo que pretende esta función es tener una salida ordenada para cada fichero que permita localizar con mayor rapidez la información deseada.

- Funcion *def muestra_resultados()*: cuya función principal es escribir en ficheros de textos, todos los parámetros almacenados en las listas. Esta función debe ser capaz de generar un fichero resumen con los parámetros significativos de cada fichero.


```

Fecha y hora: 28/08/18--15:26:04
Tipo de filtro: Gaussiano; 0,8mm
Comentario:
: Ensayo (ISO 4287)      Rp      Rv      Rz      Rt      Ra      Rq      Rsk      Rku      Rsm
: 1                      4.744222 um -4.28430 um 9.028529 um 12.20711 um 1.284204 um 1.650068 um -0.27345 4.205968 118.4922 um
: B2-5                  0.367362 um -0.48573 um 0.853099 um 1.228796 um 0.110533 um 0.144111 um -0.98956 5.517555 76.34777 um
: RN001                 11.87755 um -13.7572 um 25.63479 um 30.05807 um 4.841704 um 5.779961 um -0.07394 2.281269 80.45776 um
: RN010                 44.86866 um -41.7977 um 86.66645 um 108.9852 um 17.45957 um 20.78228 um 0.111035 2.486175 857.7499 um
: WS_1                  20.99271 um -18.6559 um 39.64861 um 70.95297 um 8.137223 um 10.63740 um 0.418811 8.559741 1092.5 um

: Ensayo (ISO 13565-2)  Rk      Rpk      Rvk      Mr1      Mr2      A1      A2
: 1                      4.078521 um 1.826614 um 6.913033 um 7.937003 % 89.30691 % 7.248921 36.96081
: B2-5                  0.351743 um 0.236250 um 1.053927 um 0.999937 % 76.84519 % 0.118117 12.20173
: RN001                 19.71425 um 3.290288 um 9.425557 um 2.381101 % 95.79401 % 3.917255 19.82188
: RN010                 86.95922 um 23.06456 um 1.882568 um 0.793700 % 99.31879 % 9.153177 0.641209
: WS_1                  6.700232 um 32.29543 um 44.65679 um 16.76300 % 69.52038 % 270.6842 680.5608

: Parámetro de relación de material  Rmr
: 1                      0.431223 % 1um bajo el pico maximo
: B2-5                  98.09386 %
: RN001                 0.368726 %
: RN010                 0.131241 %
: WS_1                  0.515544 %

```

Figura 60. Archivo resumen. En este caso estan los datos más relevantes de un lote de cinco ficheros

Tal y como se observa en la Figura 60, además de los parámetros más comunes, posee además tres líneas de encabezado donde se indica la fecha del análisis, el filtro utilizado y una fila con la línea *Comentario*, donde previo al análisis se puede la información extra que se desee.

Para el resto de ficheros resultantes del análisis, el encabezamiento posee una línea extra que indica el fichero de procedencia, tal y como se observa en la Figura 61.

```

Fichero de procedencia: DA02-4_1
Fecha y hora: 06/09/18--19:19:10
Tipo de filtro: Gaussiano; 0,8mm
Comentario:
Rp = 1.817170 um
Rv = -1.66060 um
Rz = 3.477775 um
Rt = 4.358375 um
Ra = 0.483559 um
Rq = 0.609825 um
Rsk = -0.00123 um
Rku = 3.336753 um
Rsm = 31.76904 um

```

Figura 61. Imagen correspondiente al fichero de los parámetros de rugosidad emitido tras el análisis del fichero DA02-4_1

- Funcion *def grafica_resultados_report()*: cuya labor es la de graficar las curvas obtenidas a partir de las funciones anteriores. Esta misma función genera un documento resumen para cada fichero a modo informativo para los análisis en dos dimensiones.

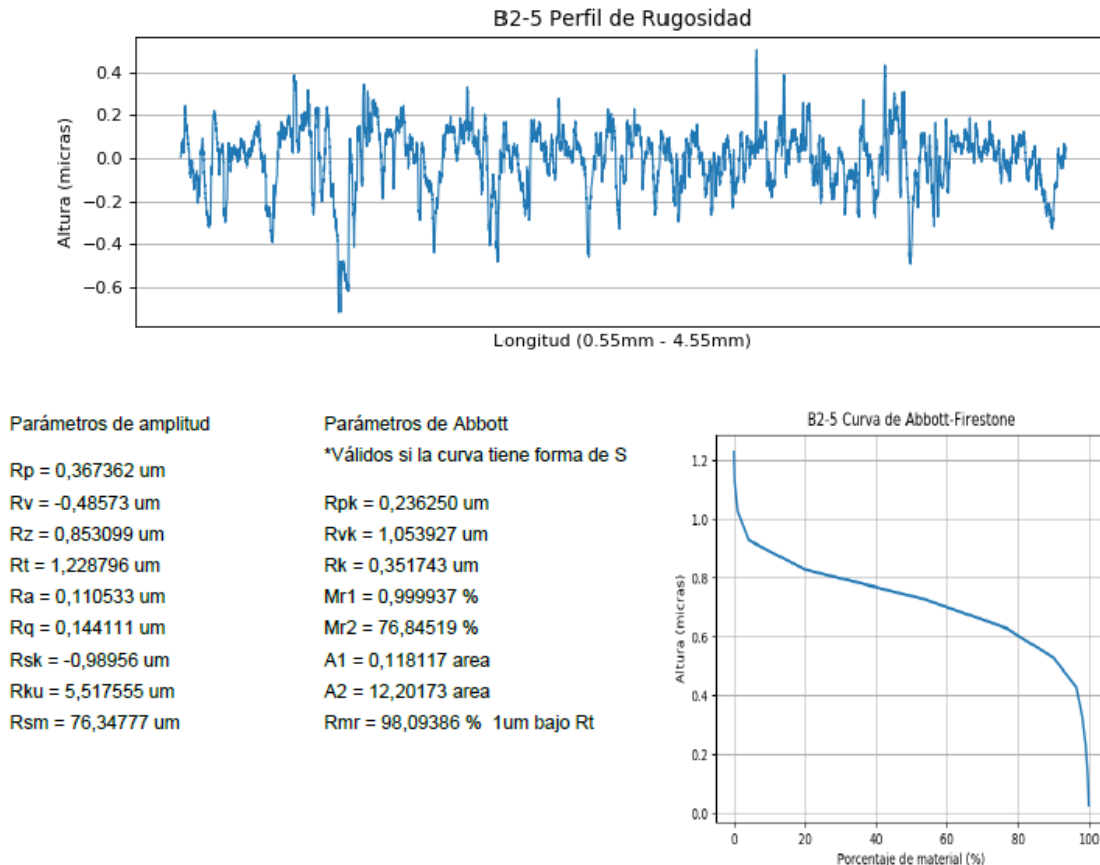


Figura 62. Documento resumen donde se muestran los resultados obtenidos más relevantes para cada fichero a estudiar.

En la *Figura 62* se observa el documento que se obtiene para cada fichero a estudio. En él aparecen los parámetros de amplitud y los parámetros de Abbott. Además, se incluyen las gráficas del perfil de rugosidad y su correspondiente curva de Abbott.

Para el caso de tres dimensiones, no se realiza representación grafica debido a que el gran tiempo de cálculo empleado no permitía realizar el análisis.

8.6. Análisis de resultados en un estudio bidimensional

Como se ha comentado anteriormente, este trabajo está basado en la creación de un programa para el cálculo y análisis de rugosidad. Una vez presentado el programa, se van a mostrar los resultados obtenidos, comparándolos con los obtenidos mediante un software comercial.

Para la comparación de la rugosidad en dos dimensiones, se han utilizado los siguientes archivos: *B2-5*, *T1* y *RN010*. En todos ellos, el filtro utilizado, ha sido un filtro Gaussiano de

longitud de corte 0,8 mm.

Los tres ficheros escogidos para el análisis, tienen como característica principal un parámetro de R_a bajo, medio y alto, de manera que sus resultados se puedan extrapolar al análisis de cualquier fichero.

En este ejercicio, se van a comparar los parámetros de amplitud y el de espaciamento, juntamente con la gráfica del perfil de rugosidad.

- Fichero B2-5:

	Valor Software Comercial (μm)	Valor programa (μm)	Error absoluto	Error relativo
Rz	0,8456	0,8531	0,0075	0,89%
Rt	1,2048	1,2287	0,0239	1,98%
Ra	0,1082	0,1115	0,0033	3,05%
Rq	0,1449	0,1441	0,0008	0,55%
Rsk	-0,9324	-0,989	0,0566	-6,07%
Rku	5,2332	5,5175	0,2843	5,43%
Rsm	90,91	76,35	14,56	16,02%

Tabla 2. Comparación de los valores del fichero B2-5

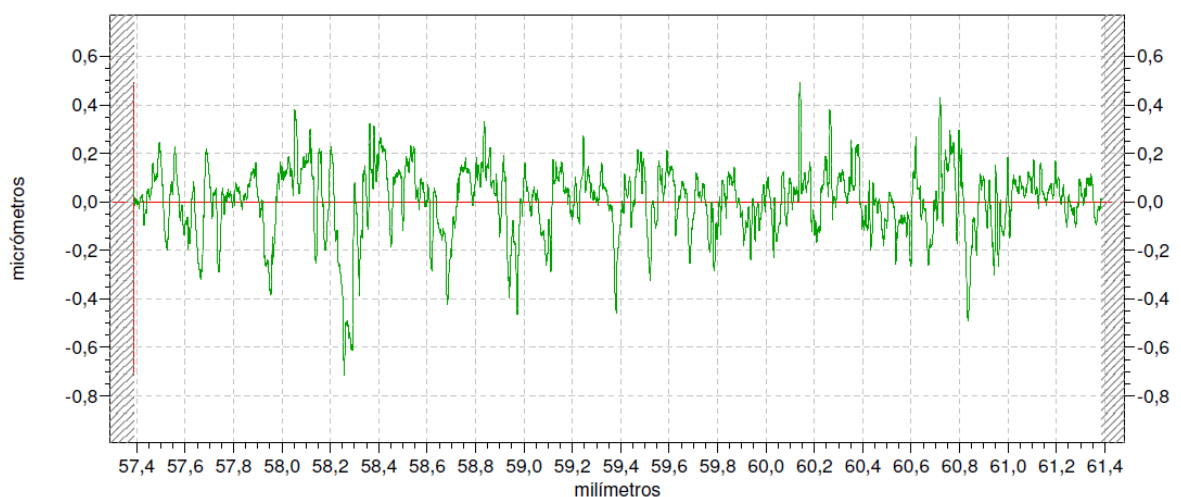


Figura 63. Perfil de rugosidad obtenido por medio del software comercial

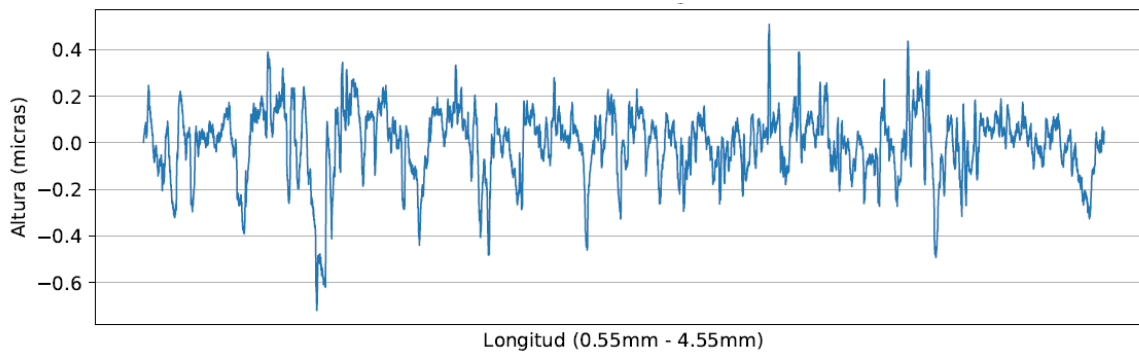


Figura 64. Perfil de rugosidad obtenido a partir del programa

El fichero *B2-5* es un análisis de una muestra con baja rugosidad. El programa se comporta de manera muy aceptable en comparación del software comercial, dando un resultado más dispar en el parámetro de espaciamiento *Rsm*.

Tal y como se puede ver en las gráficas, no se aprecia apenas diferencia entre la que proporciona el software comercial y el programa creado excepto en los extremos, pues el número de valores eliminados a causa de la aplicación del filtro gaussiano es diferente entre ambos programas.

- Fichero T1:

	Valor Software Comercial (μm)	Valor programa (μm)	Error absoluto	Error relativo
Rz	16,1381	16,234	0,0959	0,59%
Rt	16,652	16,731	0,079	0,47%
Ra	3,632	3,693	0,061	1,68%
Rq	4,271	4,321	0,05	1,17%
Rsk	0,5834	0,5679	0,0155	2,66%
Rku	2,272	2,248	0,024	1,06%
RSm	244,17	244,21	0,04	0,02%

Tabla 3. Comparación de los valores del fichero T1

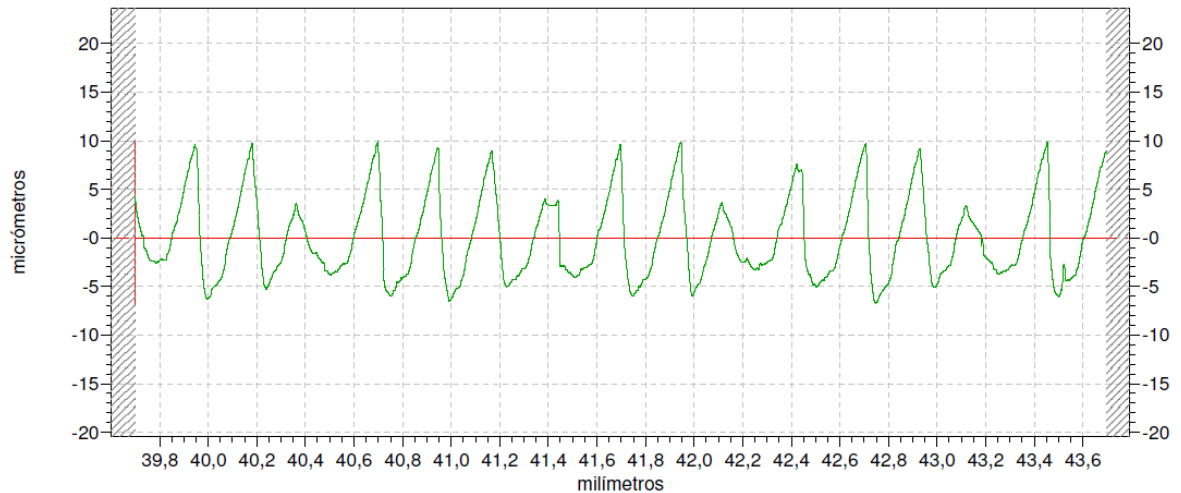


Figura 65. Perfil de rugosidad obtenido por medio del software comercial

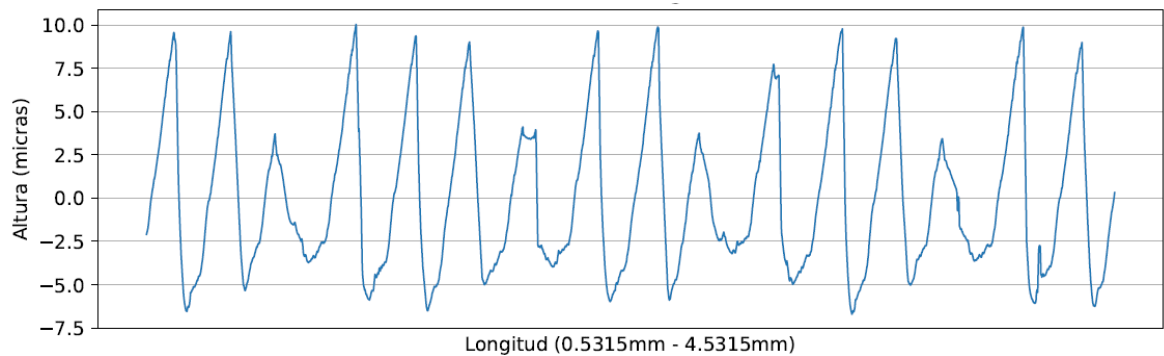


Figura 66. Perfil de rugosidad obtenido a partir del programa

El fichero *T1*, corresponde al análisis de una muestra con una rugosidad intermedia. Tal y como se puede apreciar en la comparativa, los resultados son incluso más parejos todavía que con el fichero *B2-5*. Además, respecto al parámetro RS_m , en este caso no existe tal disparidad en los resultados, esto es debido a que el corte del perfil con el eje es mucho más limpio que en el caso anterior y facilita el cálculo del parámetro.

Respecto las gráficas, no se aprecian diferencias, salvo en los extremos, debido a la aplicación del filtro gaussiano y la eliminación de los valores de los extremos.

- Fichero RN010:

	Valor Software Comercial (μm)	Valor programa (μm)	Error absoluto	Error relativo
Rz	103	86,7	16,3	15,82%
Rt	103	109	6	5,83%
Ra	18,2	17,5	0,7	3,85%
Rq	21,2	20,8	0,4	1,89%
Rsk	0,0792	0,111	0,0318	40,15%
Rku	2,28	2,49	0,21	9,21%
RSm	-	857,7	-	-

Tabla 4. Comparación de los valores del fichero RN010

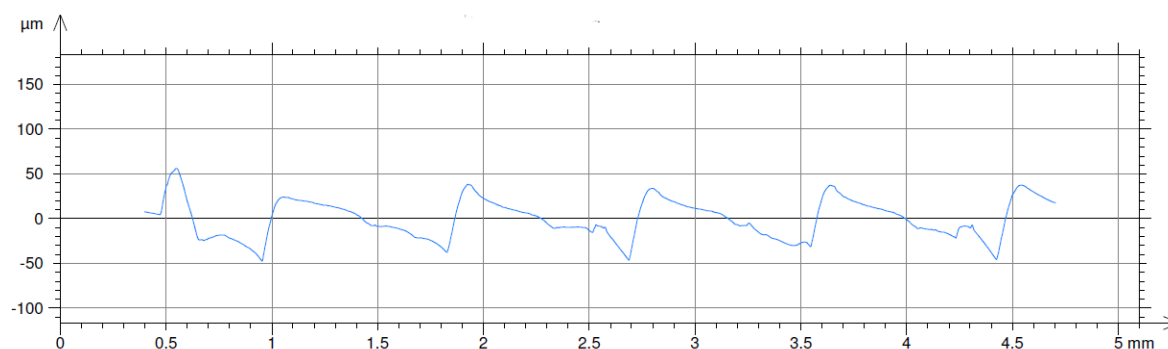


Figura 67. Perfil de rugosidad obtenido por medio del software comercial

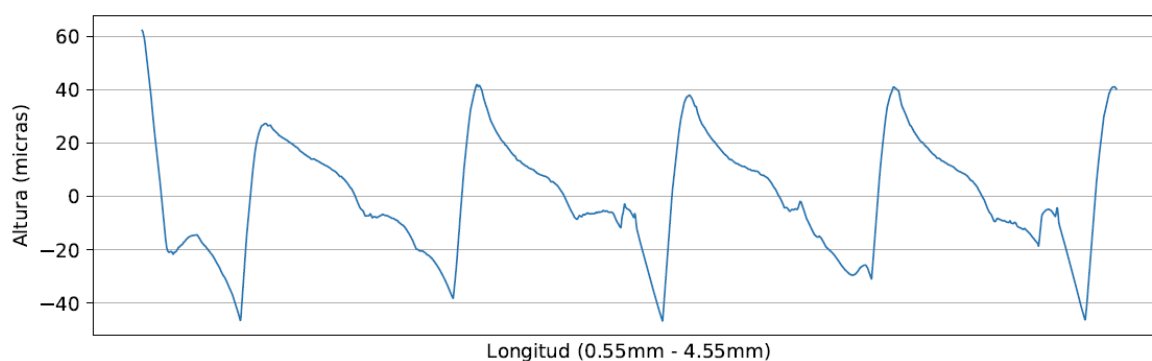


Figura 68. Perfil de rugosidad obtenido a partir del programa

El fichero *RN010*, corresponde al análisis de una muestra con una rugosidad alta. En este caso, se puede apreciar como los resultados son menos parejos que en los otros casos, este hecho puede ser debido a que en ficheros de rugosidad alta, se producen diferencias mayores en ciertos parámetros.

Respecto las gráficas, no se aprecian diferencias, salvo en los extremos, debido a la aplicación del filtro gaussiano y la eliminación de los valores de los extremos, exactamente igual que en las ocasiones anteriores.

Después de realizar la comparación de tres ficheros en sus parámetros de amplitud y espaciamiento. A partir de dos ficheros más, se van a comparar los parámetros de la curva de Abbott-Firestone.

- Fichero DD29-1:

	Valor Software Comercial (μm)	Valor programa (μm)	Error absoluto	Error relativo
Rk	6,260	6,473	0,213	3,40%
Rpk	2,946	3,100	0,154	5,23%
Rvk	3,159	5,083	1,924	60,91%
Mr1	12,030%	11,41%	0,620	5,15%
Mr2	88,835%	90,38%	1,545	1,74%
A1	17,71	17,67	0,04	0,23%
A2	17,63	24,46	7,83	38,74%

Tabla 5. Comparación de los valores del fichero DD29-1

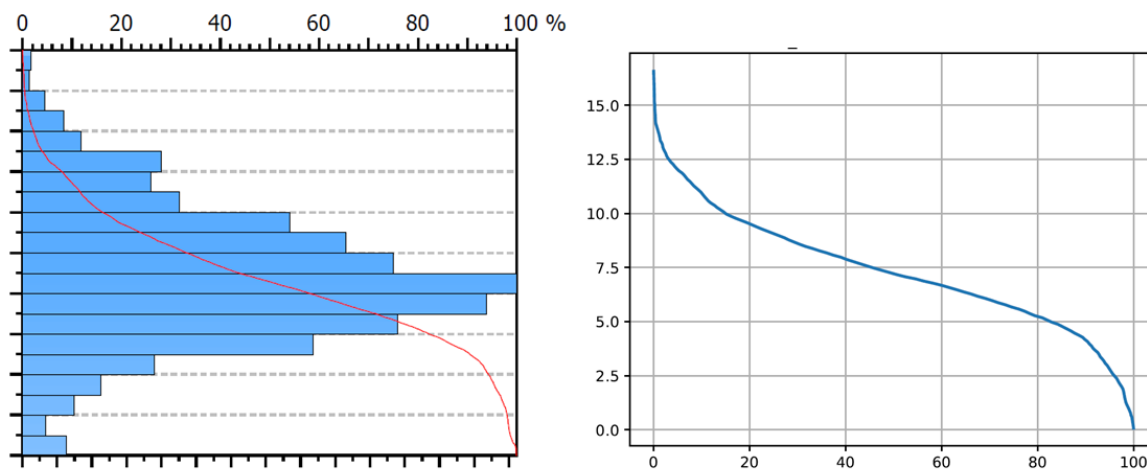


Figura 69. Comparativa de la Curva de Abbot del programa comercial (izquierda) con el programa creado (derecha)

Fichero 01:

	Valor Software Comercial (μm)	Valor programa (μm)	Error absoluto	Error relativo
Rk	3,673	4,079	0,406	11,05%
Rpk	1,5226	1,827	0,304	5,23%
Rvk	2,2674	6,913	1,924	19,99%
Mr1	9,34%	7,94%	1,4	14,99%
Mr2	88,90%	89,31%	0,41	0,46%
A1	7,11	7,24	0,04	0,23%
A2	12,58	36,96	24,38	194%

Tabla 6. Comparación de los valores del fichero 01

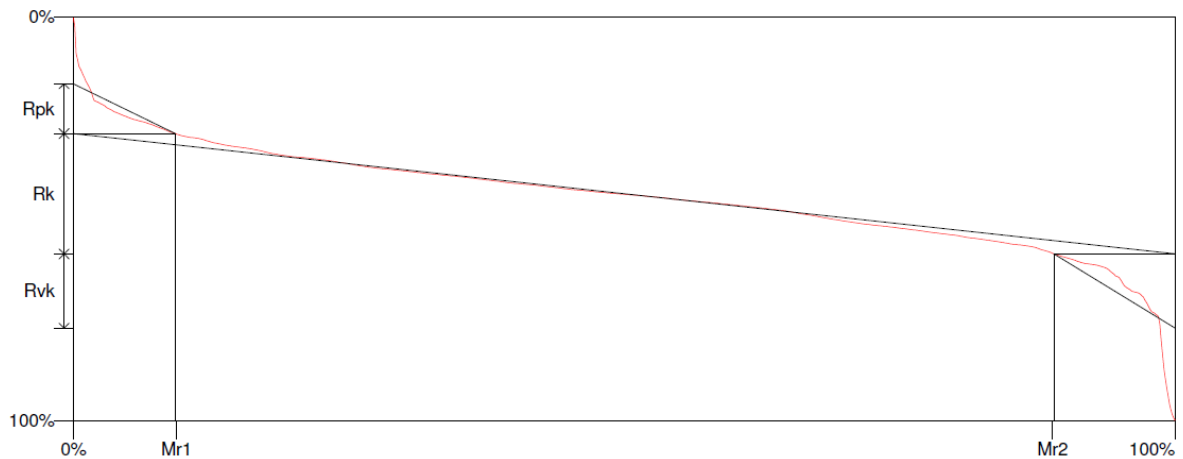


Figura 70. Curva de Abbott realizada por el programa comercial

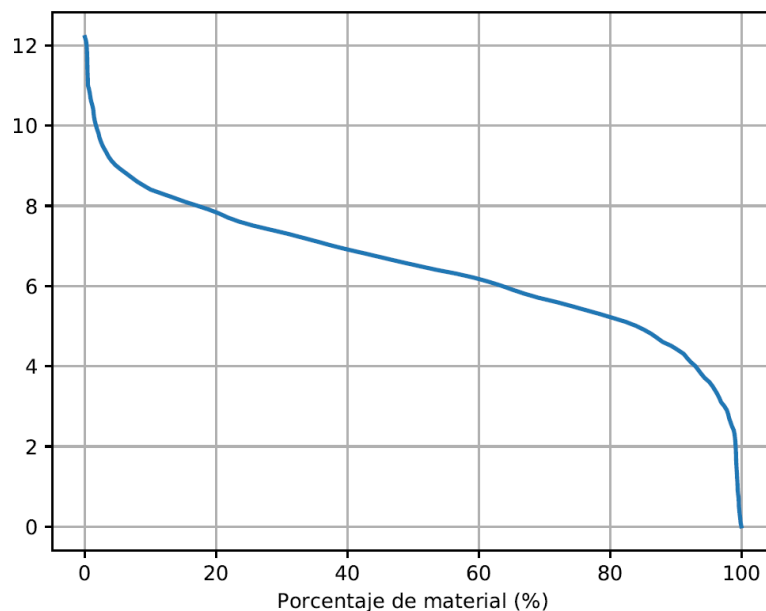


Figura 71. Curva de Abbott realizada por el programa creado

En ambos casos, se puede observar como la gráfica presenta un aspecto similar, sin notables diferencias que se puedan observar.

Centrando el análisis en los parámetros, se puede ver como los valores Rk , Rpk , $Mr1$, $Mr2$ y $A1$ no presentan grandes diferencias. En el caso de los valores de Rvk y $A2$ sí que se pueden observar diferencias significativas.

No obstante, en el conjunto de valores de la curva de Abbott se aprecian unos errores relativos mayores que en el cálculo de los parámetros de rugosidad aunque la confección del programa haya sido hecha siguiendo la normativa y el programa se haya revisado en

profundidad varias veces. Como posible solución, se ha probado una reducción del paso de cálculo para la curva de Abbott, consiguiendo así un mayor número de puntos pero no se han obtenido resultados más igualados.

9. Conclusiones

Volviendo a repasar los objetivos iniciales, se llega a un punto donde se puede observar que el programa cumple en gran medida con lo que se le había demandado. Es capaz de analizar un lote de muestras y capaz de leer diferentes formatos de entrada. Además, ofrece un documento con resultados unificados y una información completa para cada fichero.

Es una herramienta útil que permite un análisis sencillo con unos resultados claros y bien estructurado.

Además, todo este programa está complementado con la parte teórica desarrollada en la memoria, teniendo en cuenta las especificaciones indicadas en la normativa.

En el ámbito práctico, se ofrecen resultados de los parámetros más característicos de rugosidad de una forma muy exacta en comparación con los programas comerciales, con lo que es una buena alternativa en caso de necesitar un análisis básico y rápido. En la parte de los parámetros de la curva de tasa de material (curva de Abbott-Firestone), aunque los parámetros difieran en algunos casos del programa comercial, se puede extraer una idea completa de las características de la superficie estudiada.

En la parte más personal, he acabado muy satisfecho una vez terminado el programa. Al tratarse la programación de un campo que no dominaba, a base de investigación e ir haciendo las cosas paulatinamente, he podido desarrollar un programa bastante completo y que cumple con los requisitos.

9.1. Propuestas de ampliación

Se abre con este programa una línea de mejora y perfeccionamiento del programa. Para ello, se proponen una serie de puntos tanto para casos del estudio de perfiles como de superficies.

Referente al estudio del perfil los puntos propuestos son los siguientes:

- Permitir el análisis de ficheros con otra extensión distinta a los archivos *.txt*, incluyendo los formatos normalizados de ficheros de datos de rugosidad *.prf*.
- En caso de que los puntos de un fichero no estén equiespaciados, crear un algoritmo de interpolación para realizar el equiespaciado antes del análisis.

- Añadir otros tipos de filtrado distintos al filtro gaussiano.
- Reducir el error presente en el cálculo de los parámetros de la curva de Abbott, buscando una fórmula de cálculo alternativa, posiblemente equiespaciando ambos ejes en vez de solamente el eje y, tal y como está actualmente.
- Realizar el cálculo de la curva de probabilidad de material para los perfiles primario, de ondulación y de rugosidad, así como el cálculo de los parámetros.

Para el caso del análisis en tres dimensiones, los puntos de ampliación son los siguientes:

- Permitir el análisis de ficheros con otra extensión distinta a los archivos *.txt*, incluyendo los formatos normalizados de ficheros de datos de rugosidad *.sur*.
- Añadir el proceso de filtrado de la superficie, con el fin de poder calcular los parámetros de la superficie de rugosidad junto con su curva de Abbot y la de probabilidad de material.
- Implementar una representación gráfica de los resultados que no comprometa en exceso el tiempo de análisis.

Además de todos estos puntos, se puede añadir una sugerencia más. Referente al análisis de superficies, el programa actual es lento, debido a que los ficheros de superficies tienen una cantidad superior de datos respecto a los ficheros de perfil. Antes de realizar la implementación de los puntos de ampliación, posiblemente fuera preferible realizar esta parte utilizando otro lenguaje de programación o, por el contrario, aplicando otro lenguaje mucho más ágil en los algoritmos más pesados matemáticamente, y manejando el flujo del programa desde Python.

10. Agradecimientos

La realización de este proyecto no hubiese sido posible sin la colaboración, dedicación y aportación del director del proyecto Alejandro Domínguez. Me gustaría agradecer también a todo el personal que ha tenido trato conmigo o me haya dado clase del área de Fabricación del Departamento de Ingeniería Mecánica.

11. Bibliografía

- [1] P. Wentworth, J. Elkner, A. B. Downey, C. Meyers. (2018). *How to Think Like a Computer Scientist: Learning with Python 3*. Recuperado de <https://media.readthedocs.org/pdf/howtothink/latest/howtothink.pdf>
- [2] Alvarez, A. (2016). *Guía Tkinter Documentation*. Recuperado de <https://media.readthedocs.org/pdf/guia-tkinter/latest/guia-tkinter.pdf>
- [3] J. Vivancos, I. Buj, L. Costa, J. R. Gomà. (2017). *Sistemas de fabricación*. Universitat Politècnica de Catalunya. ISBN-10: 84-695-8401-4. ISBN-13: 978-84-695-8401-9
- [4] Lucchesi, D. (Ed.). (1973). *Metrotecnia, tolerancias e instrumentación*. Barcelona, España: Editorial Labor
- [5] Lucchesi, D. (Ed.). (1973). *Verificación de piezas y máquinas herramientas*. Barcelona, España: Editorial Labor
- [6] Maradudin, A. A. *Light Scattering and Nanoscale Surface Roughness*. Canada: David J. Lockwood
- [7] M. Hinojosa, M. E. Reyes. *La rugosidad de las superficies: Topometría*. Ingenierías, Abril-Junio 2001, vol IV, No 11:27–33, 2001
- [8] Keyence Product Site. *Area Roughness Parameters*. Recuperado de <https://www.keyence.com/ss/products/microscope/roughness/surface/parameters.jsp>
- [9] Keyence Product Site. *Surface Roughness Parameters*. Recuperado de <https://www.keyence.com/ss/products/microscope/roughness/line/parameters.jsp>
- [10] Galván, C. *Nuevo Software para Análisis de Datos de Rugosidad en 2D y 3D*. Recuperado de https://www.cenam.mx/simposio2008/sm_2008/info/presentaciones/SM2008-S3D1-Presentacion-Carlos%20Galvan.pdf
- [11] OLYMPUS CORPORATION. *Roughness (2D) parameter*. Recuperado de https://www.olympus-ims.com/en/knowledge/metrology/roughness/2d_parameter/
- [12] OLYMPUS CORPORATION. *Roughness (3D) parameter*. Recuperado de https://www.olympus-ims.com/en/knowledge/metrology/roughness/3d_parameter/
- [13] Engineers Handbook. *Reference Tables -- Surface Roughness Table*. Recuperado de <http://www.engineershandbook.com/Tables/surfaceroughness.htm>